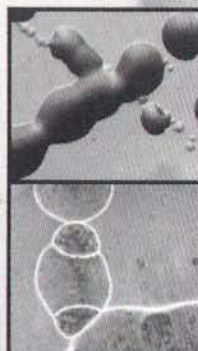
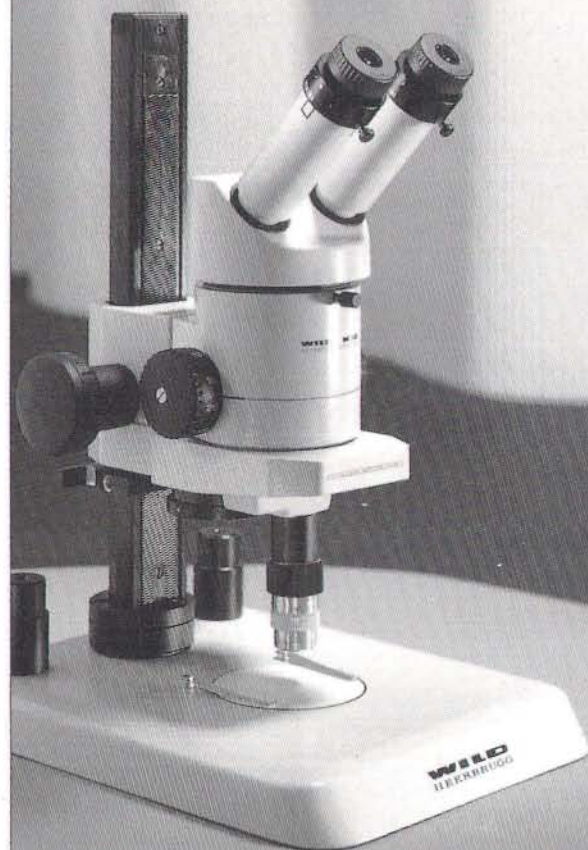


WILD Kombistereo

Een Multifunktionele Mikroskoop



De WILD Kombistereo biedt u de unieke combinatie van een stereomikroskoop met een objectief voor mikroskopisch detailonderzoek.

Met één handbeweging wisselt u tussen 3-dimensionale beoordeling of detailanalyse.

Resolutie en beeldkwaliteit van een standaard mikroskoopobjectief bij maximale vergroting (ca. 600x).

De WILD Kombistereo is naar keuze leverbaar met een vergrotingswisselaar of zoom 1:6

Neemt u voor vrijblijvende nadere informatie en/of demonstratie even contact op met onze afdeling Mikro.

Leica

LEICA B.V.
Afdeling Mikro
Postbus 80, 2280 AB Rijswijk
Verrijn Stuartlaan 7, 2288 EK Rijswijk
Tel: 070 - 3 198 999 Fax: 070 - 3 905 659

1 59^e jaargang

NATUUR '91 & TECHNIEK

natuurwetenschappelijk en technisch maandblad



TWEE HELFTEN, ÉÉN GEDACHTE

RIOLERING/ORGANISCHE ELEKTRONICA/CHEMIE IN DE KLINIEK/
DE STRUCTUUR VAN DE AARDE/DE NANOMETERDIMENSIE

Geneesmiddelen-Innovatie vandaag voor de gezondheid van morgen:

Boehringer Ingelheim stelt zich voor:

Boehringer Ingelheim begon haar activiteiten in de chemische en farmaceutische sector in 1885.

Boehringer Ingelheim neemt thans, meer dan honderd jaar later, een belangrijke plaats in op de lijst van de grootste farmaceutische ondernemingen ter wereld.

De belangrijkste doelstelling van Boehringer Ingelheim is het continueren van de activiteiten voor research en ontwikkeling van innovatieve geneesmiddelen. De onderneming

investeerde in 1987 daarvoor een bedrag van 650 miljoen Duitse Mark, hetgeen 20% van haar inkomsten uit farmaceutische producten in dat jaar uitmaakte. In 1988 is hiervoor 643 miljoen Duitse Mark geïnvesteerd, ofwel 19,0% van de totale omzet.

De research-centra van Boehringer Ingelheim bevinden zich in de Bondsrepubliek Duitsland, zowel in Ingelheim als in Biberach, in Oostenrijk (Wenen) en in Italië (Milaan). Voorts zijn er nog research-centra in

Ridgefield in de Verenigde Staten en in Kawanishi in Japan.

Enkele jaren geleden hebben, bij de dochteronderneming Dr. Karl Thomae te Biberach, onderzoek en ontwikkeling op het gebied van recombinant-DNA-technologie hoge prioriteit gekregen.

werd gesteld. Deze fabriek, waar alleen Actilyse kan worden geproduceerd, vergde een investering van 135 miljoen Duitse Mark.

Boehringer Ingelheim heeft thans eigen vestigingen in meer dan 80 landen, terwijl haar geneesmiddelen in meer dan 140 landen worden verkocht. In een

aantal prioriteitslanden met eigen vestigingen wordt klinisch onderzoek geënta-meerd en be-geleid.

Nederland is één van de belangrijkste

landen waar relatief veel klinisch geneesmiddelen-onderzoek wordt verricht, waardoor Boehringer Ingelheim Alkmaar in Nederland een belangrijke bijdrage levert aan de ontwikkeling van nieuwe geneesmiddelen.



**Boehringer
Ingelheim**

Boehringer Ingelheim bv
Postbus 8037
1802 KA Alkmaar
Telefoon 072-662463



In samenwerking met Genentech Inc. uit San Francis-co, USA, heeft Boehringer Ingelheim het eerste biotechnologisch verkregen geneesmiddel op het gebied van hart- en vaatziekten -Actilyse- op grote schaal gefabriceerd en klinisch onderzocht. Dit produkt lost stolsels op in o.a. de bloedvaten van het hart, welke de belangrijkste oorzaak van het hartinfarct vormen.

Actilyse wordt geproduceerd in het nieuwe biotechnicum te Biberach, dat op 11 november 1986 in bedrijf

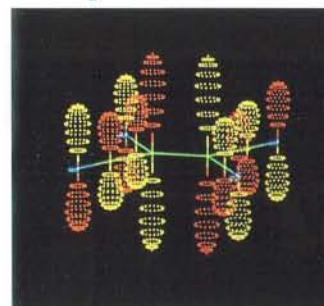
VOLGENDE MAAND IN NATUUR EN TECHNIEK

Magneet

Dr J.S. Miller en prof dr A.J. Epstein

Magneten zijn handig om boodschappenlijstjes vast te klemmen aan de ijskast, of om informatie op te slaan op een floppy-disk. Tot nog toe kennen we alleen

magneten die bestaan uit metalen en mineralen. De volgende generatie zou op nieuwe materialen kunnen berusten: organische magneten.



Andropauze

Dr J.P. Deslypere

In tegenstelling tot wat er gebeurt bij de vrouw, waar de menopauze de vruchtbare periode definitief en abrupt beëindigt, komt zo'n brutale en onomkeerbare wending niet voor bij de man. Een man kan tot op hoge leeftijd vader worden. Toch wijzen allerlei symptomen erop dat ook bij ouder wordende mannen de hormoonbalans geleidelijk verschuift.



Lezen

Drs G. Spyer

Mensen die problemen hebben bij het lezen, worden door hun omgeving vaak voor dom versleten. Ten onrechte. Hoewel we inmiddels iets van de oorzaak van leesstoornissen weten, staat de juiste remedie nog niet vast. Sommige patiënten krijgen een psychologische behandeling.



Er zijn echter ook artsen die liever pillen voorschrijven.

Veenlijken

Dr W.A.B. van der Sanden

Al sinds de 17e eeuw worden in venen menselijke lichamen aangetroffen. De roem van deze geconserveerde lijken evenaart die van

de Egyptische mummies. Helaas is slechts een fractie ervan voor wetenschappelijk onderzoek bewaard gebleven.

KIJK OP WETENSCHAP

Kanker en oncogenen



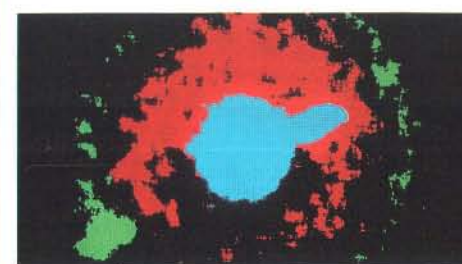
De oorzaken van kanker zijn complex en gevarieerd. Medische wetenschappers beginnen nu de moleculaire basis van deze volksziekte te doorgronden. Daarmee groeit de hoop dat kanker ooit kan worden beteugeld.

Melkwegkern

Prof dr J.H. Oort

De kern van onze Melkweg ligt versluierd achter dichte stofwolken, die het licht enorm verzwakken. Zij werd pas waarneembaar na de ontwikkeling van de radio-astronomie. Inmid-

dels weten we dat de werkelijke kern een zwart gat is met een massa van miljoenen zonnen. Ter plaatse heerst een sterk magnetisch veld en de kern is blauw.



Oplossing november

De professor heeft zich nogal lang moeten bezighouden met het tellen van chips. Uiteindelijk is hij er toch uitgekomen. Hij onthield het grootste nummer dat tussen de eerste 36 800 chips voorkwam, en wees het eerstvolgende nummer dat groter was aan als het waarschijnlijk grootste nummer. Hoe kwam de professor tot het getal 36 800?

Het aantal fiches is n en de professor zegt de eerste p keer: "Nee, dit is niet het grootste getal". Bij het eerstvolgende getal dat groter is, neemt de professor aan dat hij het grootste getal in handen heeft. Allereerst bepaalde de professor de kans op succes als functie van p , waarna hij vervolgens p zo kiest dat de kans optimaal wordt. De professor heeft succes als het getal $p+1$ groter is dan de eerste p getallen, en alle latere getallen ($p+2$, $p+3$ enz.) kleiner zijn. De kans hierop is:

$$\frac{1}{p+1} \cdot \frac{p+1}{p+2} \cdot \frac{p+2}{p+3} \dots \frac{n-1}{n} + \frac{1}{p} \cdot \frac{p}{n}$$

Hij heeft ook succes als niet $p+1$ maar het getal $p+2$ het grootste is. De kans daarop is:

$$\frac{p}{p+1} \cdot \frac{1}{p+2} \cdot \frac{p+2}{p+3} \dots \frac{n-1}{n} + \frac{1}{p+1} \cdot \frac{p}{n}$$

Deze kans is ook te berekenen voor de overige getallen. Daarmee wordt de totale kans op succes voor de professor:

$$\left(\frac{1}{p} + \frac{1}{p+1} + \dots + \frac{1}{n-1} \right) \cdot \frac{p}{n}$$

Een goede benadering voor deze formule is:

$$\frac{p}{n} \int \frac{1}{t} dt = -\frac{p}{n} \ln \frac{p}{n}$$

Het maximum van de functie $-\ln x$ bepalen we door differentiatie. Dit is gelijk aan e^{-1} en wordt bereikt voor $x = e^{-1}$. Afgerond is dit gelijk aan 0,368. Aangezien n gelijk is aan 10^5 , laat de professor

PRIJSVRAAG

dus de eerste 36 800 getallen passeren en kiest het eerstvolgende getal dat groter is dan alle voorgaande. Daarmee is de kans op succes ongeveer 0,368.

De lootprijs, een boek naar keuze uit de Wetenschappelijke Bibliotheek van Natuur & Techniek, is

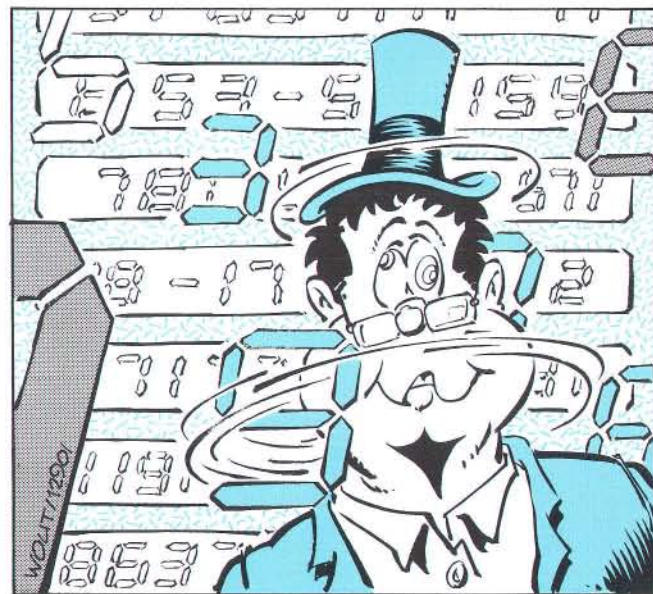
De nieuwe opgave

De professor zit zich op een lange winteravond te vervelen. Het sneeuwt buiten en een gure wind waait rond het huis. Terwijl de professor wacht op de postbode, die wel weer een stapel oplossingen van de prijsvraag zal brengen, speelt hij met zijn rekenmachine. Hij rommelt op het LCD-schermje wat met getallen. Steeds neemt hij een getal A van vier verschillende cijfers. Hieruit vormt hij dan een getal B , bestaande uit de vier cijfers in afdalende volgorde, en een getal C , bestaande uit de vier cijfers in klimmende volgorde. Hij trekt

deze maand terechtgekomen bij B.M. van den Heuvel uit Dordrecht. De top van de laddercompetitie is bereikt door P.H. Schippers uit Roosendaal, die daarmee een gratis jaarabonnement op Natuur & Techniek in de wacht heeft gesleept.

vervolgens C van B af, en begint vervolgens opnieuw, waarbij hij A vervangt door de zojuist behaalde uitkomst. De professor vraagt zich af hoe dit spelletje zal aflopen, en of dit spel altijd op dezelfde wijze afloopt. Wie heeft voor hem het antwoord?

Oplossingen van deze opgave, die beschikbaar werd gesteld door de Stichting Wiskunde Olympiade Nederland, dienen voor 4 februari 1991 te arriveren op het adres: Natuur & Techniek
Puzzelredactie
Postbus 415
6200 AK MAASTRICHT



NATUUR '91 & TECHNIEK

Losse nummers:
f 11,75 of 230 F.

natuurwetenschappelijk en technisch maandblad



Bij de omslag

Eén hoofd met twee gezichten, zo zouden we ons mensen met een verbroken verbinding tussen hun hersenhelften, kunnen voorstellen. De coördinatie tussen linker- en rechter-hersenvuncties faalt en beide helften gaan elk hun eigen weg. Wendy Heller verhaalt op pag. 50 e.v. over het onderzoek aan zulke mensen. Dat leverde een schat aan gegevens op over de taakverdeling in ons brein.

(Foto: Paul Mellaart, Maastricht)

Hoofdredacteur: Th.J.M. Martens.
Adj. hoofdredacteur: Dr G.M.N. Verschuuren.
Redactie: Drs G.F.M. Hendrickx, Drs T.J. Kortbeek, Drs E.J. Vermeulen.
Redactiesecretariaat: R.A. Bodden-Welsch, Drs L.P.J. Slangen.
Onderwijscontacten: W.H.P. Geerits, tel.: 0(0-31)4759-1305.
Redactiemedewerkers: Drs J. Bouma, Drs G.P.Th. Kloeg, A. de Kool, Prof dr H. Lauwerier, Drs J.C.J. Masschelein, Ir S. Rozendaal, N.I.M. van Wetten, Dr J. Willems.
Wetenschappelijke correspondenten: Ir J.D. van der Baan, Dr P. Bentvelzen, Dr W. Bijleveld, Dr E. Dekker, Drs C. Floor, Dr L.A.M. van der Heijden, Ir F. Van Hulle, Dr F.P. Israël, Drs J.A. Jasperse, Dr D. De Keukeleire, Dr F.W. van Leeuwen, Ir T. Luyendijk, Dr P. Mombaerts, Dr C.M.E. Otten, Ir A.K.S. Polderman, Dr J.F.M. Post, R.J. Querido, Dr A.F.J. van Raan, Dr A.R. Ritsema, Dr M. Sluysen, Dr J.H. Stel, J.A.B. Verduijn, Prof dr J.T.F. Zimmerman.

Redactie Adviesraad: Prof dr W.J. van Doorenmaalen, Prof dr W. Fiers, Prof dr H. van der Laan, Prof dr ir A. Rörsch, Prof dr R.T. Van de Walle, Prof dr F. Van Noten.

De Redactie Adviesraad heeft de taak de redactie van Natuur & Techniek in algemene zin te adviseren en draagt geen verantwoordelijkheid voor afzonderlijke artikelen.

Vormgeving: H. Beurskens, J. Pohlen, M. Verreijt.
Druk: VALKENBURG OFFSET BV, Echt (L.).

Redactie en administratie zijn te bereiken op:
Voor Nederland: Postbus 415, 6200 AK Maastricht. Voor België: Boechtstraat 15, 1860-Meuse/Brussel. Tel.: 0(0-31)43 254044 (op werkdagen tot 16.30 uur). Fax: 0(0-31)43 216124.

Voor nieuwe abonnementen: 0(0-31)43 254044 (tot 20.30 uur, óók in het weekend).

Artikelen met nevenstaand vignet resulteren uit het EURO-artikelen project, waarin NATUUR & TECHNIEK samenwerkt met ENDEAVOUR (GB), LA RECHERCHE (F), BILD DER WISSENSCHAFT (D), SCIENZA E TECNICA (I), PERISCOPIO TIS EPISTIMIS (GR) en MUNDO CIENTIFICO (E), met de steun van de Commissie van de EG.

Gehele of gedeeltelijke overname van artikelen en illustraties in deze uitgave (ook voor publicatie in het buitenland) mag uitsluitend geschieden met schriftelijke toestemming van de uitgever.

Een uitgave van

ISSN 0028-1093

Centrale uitgeverij en adviesbureau b.v.

INHOUD

AUTEURS IV

HOOFDARTIKEL/Verwondering 1

RIOLERING 2

Wel en wee

J.B.M. Wiggers

Dankzij de riolering kunnen we regen- en afvalwater gemakkelijk en hygiënisch kwijt. In onze samenleving is riolering eenvoudig niet meer weg te denken. Toch is het hoog tijd om eens diep na te denken over de toekomst van deze voorziening, want het profijt dat wij stedelingen ervan hebben, weerkomt zich op het milieu. Daar komt het afvalwater uiteindelijk terecht, en ondanks intensieve zuivering bevat het nog altijd te veel schadelijke stoffen. Gelukkig verkeert een groot deel van de riolering in slechte staat. Nu we het stelsel toch moeten vervangen, kunnen we met een doordacht ontwerp het milieu best sparen.



LADEN MET LICHT 14

Organische dioden en schakelaars

J.W. Verhoeven

Sinds 1950 is de wereld van de elektronica flink in beweging geweest. Transistoren werden steeds kleiner en zijn nu met tienduizenden terug te vinden op één chip. Alhoewel men steeds meer schakelingen op een klein plakje silicium kan onderbrengen, is er een grens aan de verkleining van structuren op een siliciumrooster. In de organische chemie is men echter in staat om vrijwel elk gewenst molecuul te realiseren. Als organische molekulen bovendien kunnen werken als elektronische schakelaars, ligt daarmee een wereld vol mogelijkheden open voor een nieuw type moleculaire chip.



MENSEN METEN 26

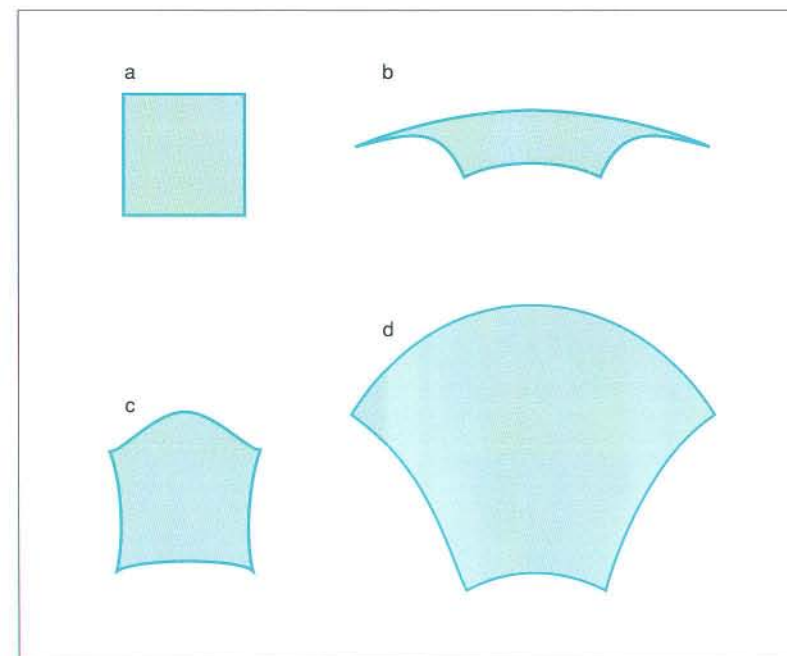
Chemie in de kliniek

P.M.W. Janssen en J.L. Willems

Geneeskunde is vanouds een kunst gebaseerd op ervaringen. De dokter van weleer die op alle markten thuis was, groeide echter in de laatste eeuw uit tot een team van specialisten met elk een apart stuk kennis. Zo'n artsenteam is steeds beter in staat de onderliggende oorzaken van ziekten op te sporen. De bijdrage van de basiswetenschap scheikunde was en is hierbij van cruciale betekenis. Zij kan helpen bij het vaststellen en het volgen van een ziektebeeld. Een medische specialist heeft daarom behoefte aan laboratoriumbepalingen - de bijdrage van de klinische chemie.



SIMULATICA



MERCATOR toont de projecties van een vierkant eiland (a) op diverse breedtegraden. Voor deze tekeningen is k gelijk aan 10. Afgebeeld zijn de gewone cilinderprojectie (b), de Sanson-Mercatorprojectie (c) en de Mercatorprojectie (d).

kozen methode, vreemde en wellicht onverwachte vervormingen optreden, vooral wanneer het vierkant zich op hogere breedtegraden bevindt. Voor een deel komt dat doordat een breedte-cirkel (in tegenstelling tot de lengtecirkels en de evenaar) geen kortste verbinding tussen twee punten levert. De kromming van de horizontale zijden van het vierkant neemt derhalve toe naarmate we op hogere breedtegraden komen. De verticale zijden van het vierkant strekken zich bij de opschuiving over een telkens groter gebied van lengtegraden uit. Dat laatste levert bij projectie soms een soort trapeziumachtige vertekening met kromme zijden. Men moet het zelf op het computerscherm zien om te begrijpen hoe onbetrouwbaar een kaart kan zijn. Het programma is zodanig geschreven dat men het met weinig moeite kan uitbouwen of toepassen op andere situaties. De projectieformules vindt men aan het einde als een regelige subroutines. Met het getal p kan men de gewenste projectiemethode uitkiezen. Het eiland is in de regels 60-90 vastgelegd met de α, β -coördinaten van de hoekpunten. In het programma vullen we op elke zijde die punten door interpolatie aan met een extra aantal punten: het getal n gekozen als 16 op regel 50. De interpolatie staat op regel 180. Aldus

kan het vierkant in elke ligging uit 4n losse puntjes getekend worden. De verplaatsing van het gebied over het boloppervlak geschiedt voor elk punt in de subroutine 240-310. Van elk punt (α, β) worden eerst de x, y, z -coördinaten bepaald en vervolgens vindt een rotatie ten opzichte van de evenaar plaats om de y -as over de hoek α te draaien (Verticale Verplaatsing). Het terugrekenen naar nieuwe α, β -coördinaten vereist enige zorg, zoals verwerkt in de regels 280-300. Het programma kan natuurlijk nog op allerlei wijzen worden uitgebreid en gevarieerd. Dat laten we, als gebruikelijk in deze rubriek, graag aan de inventiviteit van de lezer over.

niet, de cilinderprojectie is evenmin hoektrouw of conform. De beschreven methode staat bekend als de equidistante cilinderprojectie.

Met een kleine aanpassing kunnen we deze projectiemethode wel equivalent maken. We gaan proberen uit te vinden of een door formules:

$$u = f(\alpha) \text{ en } v = g(\beta)$$

bepaalde projectiemethode al of niet vlaktrouw is. Daarbij kunnen we gebruikmaken van de kennis dat een klein (infinitesimaal) rechthoekje op de bol een oppervlak bezit met de grootte $\cos\beta \, d\alpha \, d\beta$.

Hieraan is duidelijk de invloed van de breedtegraad β te zien. Een kleine wiskundige overweging laat zien dat met $u = \alpha$ en $v = \sin\beta$

de kaart inderdaad vlaktrouw is. De meetkundige interpretatie is, dat we evenwijdig aan het vlak door de evenaar en loodrecht op het cilinderoppervlak punten van de bol projecteren. Een wiskundige zou nog wel meer transformaties kunnen bedenken die een vlaktrouwe kaart garanderen.

Het programma
MERCATOR geeft
inzicht in de be-
trouwbaarheid van
kaarten.

```
10 REM ***KAARTPROJECTIE***
20 REM ***NAAM:MERCATOR***
30 SCREEN 9 : CLS : PI=4*ATN(1)
40 WINDOW (-4,-3)-(4,3)
50 M=4 : N=16
60 DIM A(M),B(M),X(M),Y(M),Z(M),U(M),V(M)
70 DATA -18,-18,18,-18,18,18,-18,18
80 FOR I=0 TO M-1 : READ A(I),B(I)
90 A(I)=A(I)*PI/180 : B(I)=B(I)*PI/180
100 NEXT I
110 A(M)=A(0) : B(M)=B(0)
120 PRINT "KIES PROJECTIEMETHODE"
130 PRINT "1 = EQUIDISTANTE CILINDERPROJECTIE"
140 PRINT "2 = GEWONE CILINDERPROJECTIE"
150 PRINT "3 = MERCATORPROJECTIE"
160 PRINT "4 = SANSON-MERCATORPROJECTIE"
170 INPUT "KEUZEGETAL = ",P : CLS
180 FOR K=0 TO 12 : VV=K*PI/30
190 FOR I=0 TO M-1 : FOR J=0 TO N
200 A=((N-J)*A(I)+J*A(I+1))/N
210 B=((N-J)*B(I)+J*B(I+1))/N
220 GOSUB 270
230 ON P GOSUB 360,370,380,390
240 PSET (U,V)
250 NEXT J : NEXT I
260 A$=INPUT$(1) : CLS : NEXT K : END
270 X=COS(A)*COS(B)
280 Y=SIN(A)*COS(B) : Z=SIN(B)
290 XV=X*COS(VV)-Z*SIN(VV)
300 YV=Y : ZV=X*SIN(VV)+Z*COS(VV)
310 B=ATN(ZV/SQR(1-ZV*ZV+.000001))
320 IF XV>0 THEN A=ATN(YV/XV)
330 IF XV=0 THEN A=SGN(YV)*PI/2
340 IF XV<0 THEN A=ATN(YV/XV)+PI*SGN(YV)
350 RETURN
360 U=A : V=B : RETURN
370 U=A : V=SIN(B) : RETURN
380 U=A : V=LOG(TAN(PI/4+B/2)) : RETURN
390 U=A*COS(B) : V=B : RETURN
400 END
```

Het lukt bijvoorbeeld met

$$u = \alpha \cos\beta \text{ en } v = \beta,$$

een methode die in de cartografie bekendstaat als de Sanson-Mercator-projectie.

We komen tenslotte bij de echte Mercator-projectie, een methode die noch vlaktrouw noch hoektrouw is, maar die wel een kaart levert welke voor de scheepvaart heel handig is. Voor een zeevaarder, en zeker voor een uit de tijd van Mercator, is het aantrekkelijk een vaste koers uit te kunnen zetten waarbij bijvoorbeeld meridiaanlijnen onder een vaste hoek worden gesneden. Het schip volgt dan een curve die bekend staat als een *loxodroom*. Voor kleine afstanden wijkt die curve niet zoveel af van de geodetische lijn, een boog van een grote cirkel. Bij de Mercatorkaart correspondeert een loxodroom op de bol met een rechte lijn. De schipper heeft met andere woorden niet veel anders te doen dat op de kaart een rechte lijn uit te zetten. De Mercatorprojectie geeft een geweldige vervorming in de buurt van de polen. Dat blijkt ook uit de wiskundige formulering

$$u = \alpha \text{ en } v = \log(\tan(\pi/4 + \beta/2)).$$

Voor het oppervlakte-element geeft een kleine berekening het resultaat $du \, dv = d\alpha \, d\beta / \cos\beta$.

Dat scheelt met het overeenkomstige element op de bol een factor $\cos^2\beta$. Op een breedtegraad van 60 graden is dat al een factor 4.

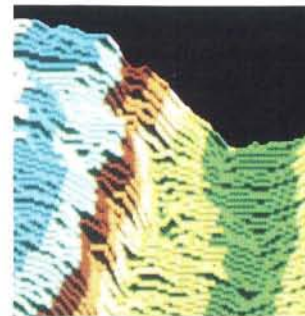
Nu we een paar bekende projectiemethoden aan de hand van wiskundige formuleringen hebben besproken, rest ons ze toe te passen. Met behulp van de computer kunnen we onderzoeken welke vervormingen optreden bij de weergave van een bol in een vlak. Daartoe gebruiken we het programma MERCATOR.

In dit programma gaan we uit van een vierkant gebied dat zich als een eiland uitstrekt in de buurt van de evenaar en bij de nul-meridiaan. We laten dat eiland in twaalf stappen naar de noordpool opschuiven. Bij elke stap laten we op het beeldscherm zien hoe een van de besproken projectiemethoden het eiland weergeeft.

Dat opschuiven van het vierkant komt overeen met een rotatie van het aardoppervlak om een horizontale as in het vlak door de evenaar. Het vierkant blijft dus onder alle omstandigheden een vierkant, een afbeelding die congruent is met die in de oorspronkelijke positie. We zien dat, afhankelijk van van de ge-

NATUUR '91 & TECHNIEK

januari/59^e jaargang 1991



KIJK OP WETENSCHAP

De structuur van de aarde

Richard Fifield

De laatste eeuw hebben geologen het binnenste van onze planeet grondig onderzocht. Zij hebben aangetoond dat de aarde is opgebouwd uit een aantal vaste en vloeibare lagen, die zijn gerangschikt als de schillen van een ui. Toen ze probeerden een scherp beeld van het inwendige te krijgen, ontdekten de aardwetenschappers dat de buitenste aardstijl, de korst waarop wij leven, voortdurend in beweging is.

DE NANOMETERDIMENSIE

38

Grensvlak tussen wetenschap en techniek

F. Meijer

De wetenschappelijke resultaten van dertig jaar oppervlakte-onderzoek leidden tot nieuwe technieken, die nu worden toegepast bij halfgeleiderprodukten zoals lasers en transistoren. De nanometerdimensie geeft steeds weer nieuwe eigenschappen bloot, die zullen leiden tot nieuwe produkten, bijvoorbeeld magneto-optische platen voor gegevensopslag. Dankzij de snelle ontwikkeling van de techniek kan men materialen maken waarin zich nieuw ontdekte verschijnselen afspelen en zijn meetmethoden in geperfectioneerde vorm commercieel verkrijgbaar.

DE BRUG IN HET BREIN

50

Twee helften, één gedachte

Wendy Heller

Mensen met een doorgesneden verbinding tussen de twee hersenhelften, zogenaamde split-brainpatiënten, zijn uitstekende proefpersonen voor het bestuderen van de functionele verschillen tussen de linker- en rechterhersenhelft. De linkerhelft blijkt vooral in staat tot verbale en analytische functies, terwijl de rechterhelft ruimtelijke en synthetische vermogens aan de dag legt. Voor hogere functies, en zeker voor prestaties op het allerhoogste niveau, is een samenspel tussen beide onontbeerlijk. Dat wordt bereikt door voortdurende communicatie tussen de hersenhelften.

ANALYSE & KATALYSE/De opmars der kunstmatige zintuigen 60

ACTUEEL 65

SIMULATICA/Cartografie 70

PRIJSVRAAG 76

AIDS

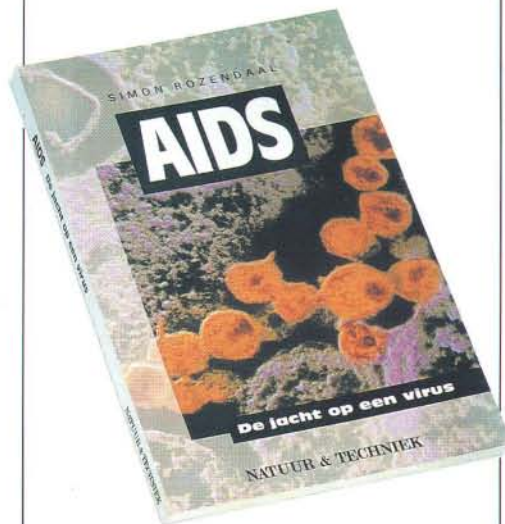
Een AIDS-special in boekvorm

168 pagina's met een schat aan verduidelijkende schema's en illustraties in vierkleurendruk. Een boek over AIDS met als titel: *De jacht op een virus*.

De hoofdttekst is geschreven door de bekende wetenschapsjournalist ir Simon Rozendaal. Verder bevat het boek een aantal bijdragen van zo'n twintig vooraanstaande virologen, immunologen, hematologen en epidemiologen uit binnen- en buitenland, plus een inleiding van de ontdekker van het AIDS-virus: professor Luc Montagnier.

Deze rondgang langs de belangrijkste centra van onderzoek laat de lezer van zeer nabij getuige zijn van de internationale jacht op het meest gevreesde en meest ongrijpbare virus van de mensheid, inclusief de belastende feiten, de sterke en zwakke vermoedens, maar ook de onenigheid in het forum van de wetenschappelijke 'getuigen'.

Prijs f35,- of 685 F.
Voor abonnees f25,- of 490 F.



AUTEURS

Prof ir J.B.M. Wiggers ('Riolering'), in Borne geboren op 7 augustus 1940, studeerde van 1962 tot 1969 civiele techniek aan de TU Delft. Van 1966 tot 1970 werkte hij bij het Waterlooppkundig Laboratorium in Delft. Sindsdien is hij verbonden aan DHV Raadgevend Ingenieursbureau BV. In 1989 werd hij daarnaast deeltijds hoogleraar in Delft.

Prof dr J.W. Verhoeven ('Organische elektronica') studeerde fysisch-organische chemie aan de Universiteit van Amsterdam. Daar promoveerde hij in 1969. Sinds 1980 is hij hoogleraar organische chemie aan dezelfde universiteit en sinds 1987 gasthoogleraar aan de Katholieke Universiteit Leuven.

Dr P.M.W. Janssens ('Klinische chemie') studeerde biochemie aan de Universiteit van Amsterdam, waar hij na zijn studie vier jaar onderzoek deed. Vervolgens werkte hij twee jaar aan de RU Leiden en promoveerde aldaar in 1987. Sindsdien is hij als klinisch chemicus verbonden aan de KU Nijmegen. Hij is biochemisch adviseur voor Van Dale-woordenboeken.

Dr J.L. Willems ('Klinische chemie') werd geboren in Nijmegen, op 20 maart 1948, studeerde daar scheikunde en promoveerde er in 1978. Hij is verbonden aan het Nijmeegse academische Sint Radboudziekenhuis, waar hij hoofd was van het laboratorium voor kindergeneeskunde. Nu leidt hij er het Centraal Klinisch Chemisch Laboratorium.

Prof dr F. Meijer ('Nanometerdimensie') is geboren in Haarlem op 22 april 1937. Hij studeerde scheikunde aan de Universiteit van Amsterdam, waar hij in 1965 promoveerde. Hij is sinds zijn afstuderen in 1962 verbonden aan het Natuurkundig Laboratorium van Philips; sinds 1988 als directeur chemie.

Dr W. Heller ('Hersenhelften') werd op 1 augustus 1954 geboren in Philadelphia in de Amerikaanse staat Pennsylvania. Ze studeerde neuropsychologie in Chicago, waar ze in 1986 promoveerde op een onderzoek bij kinderen naar de organisatie van emoties in de hersenen. Nu is ze 'assistant professor' psychologie aan de universiteit van Illinois.

komstige coördinaten van de de nieuwe positie. Alvorens de nieuwe ligging te tekenen, verwijdert het programma in de regels 260-280 de oude situatie. Daarna brengt het in de regels 300-320 de nieuwe positie, voorzover zichtbaar, op het scherm. De toets op onzichtbaarheid zou voor een wiskundige wellicht verbetering behoeven, maar om praktische redenen laten we het liever zo. Alleen voor een eiland met lange rechte kustlijnen krijgen we storende randeffecten. Tenslotte moet bij het opschuiven met een stapje het programma de array (u,v,w) vervangen door (u₁, v₁, w₁); dit noemen we het zogenaamde updating.

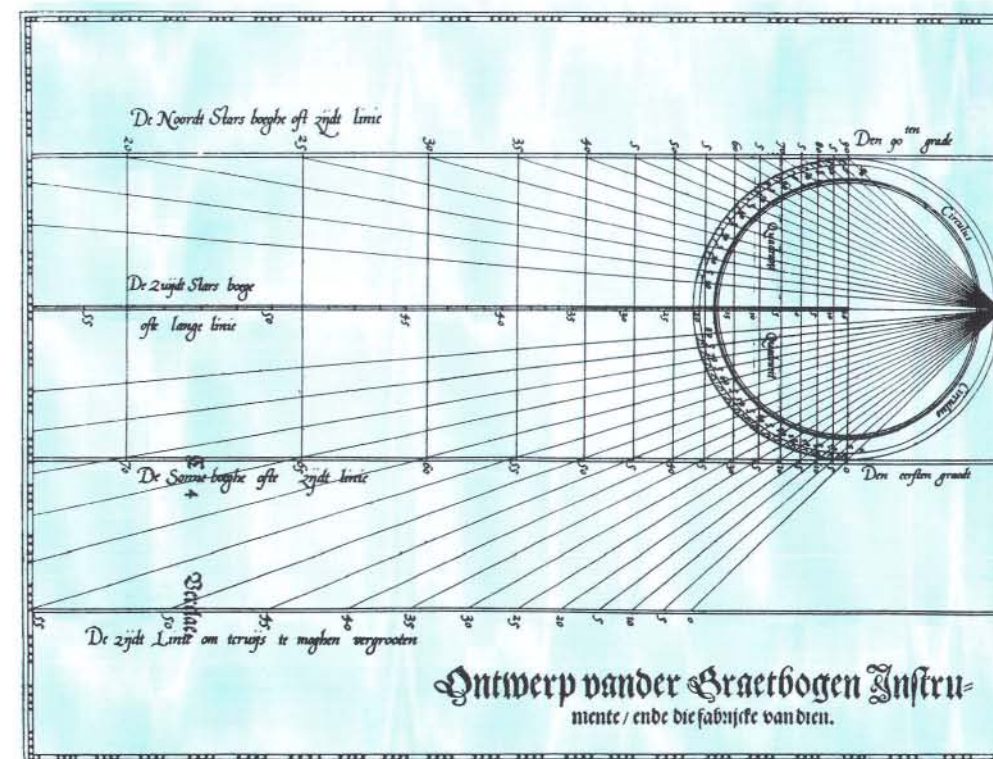
Projectiemethoden

Wanneer we tevreden zijn met een vlakke afbeelding van een klein gedeelte van een boloppervlak, kunnen we volstaan met de orthogonale projectie op bijvoorbeeld het raakvlak in het centrum van het gebied dat we willen afbeelden. Naar verwachting zullen vervormingen van de afbeelding des te storender zijn, naarmate we verder van

het raakpunt zijn verwijderd. Voor een beter resultaat komen andere projectiemethoden in aanmerking. De wellicht meest voor de hand liggende methode om bijvoorbeeld de gehele aardbol af te beelden, is de *cilinderprojectie*. Daarbij denkt men de bol omhuld door een rakende cilinder. Nemen we aan dat de as van de cilinder samenvalt met de rotatie-as van de aarde, dan projecteren we punten (α, β) van de bol op een nader te bepalen wijze op het cilinderoppervlak, waarna we de cilinder in een plat vlak afrollen. In het eenvoudigste geval stemmen de Cartesische coördinaten (u,v) van de vlakke kaart precies overeen met de bolcoördinaten, dus: u = α en v = β.

De kaart ziet er uit als een liggende rechthoek met de verhouding 2π:1. Alles staat keurig op zijn plaats, maar de grootte klopt niet erg. Gebieden bij de evenaar zien er betrouwbaar uit, maar bij de polen is alles veel te groot. De kaart is dus niet vlaktrouw; de methode is blijkbaar niet equivalent. Op een boloppervlak meten we afstanden doorgaans in hoekmaat, maar ook dat klopt

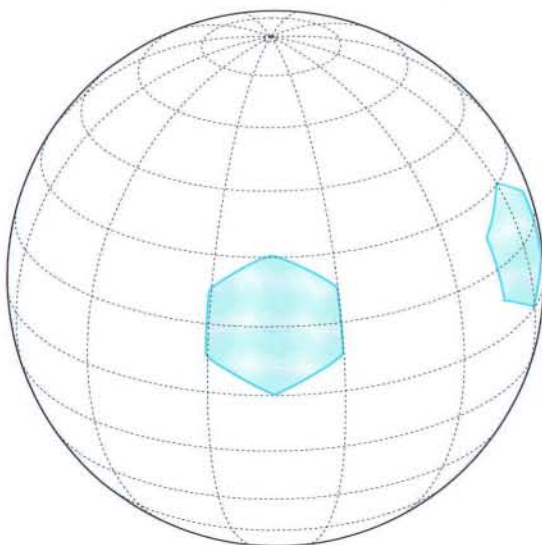
Gelukkig voorzagen de 17e eeuwse cartografen de gebruiker van hun kaarten van een nauwkeurige handleiding voor de bouw van een 'Graetbogen Instrumente' (afbeelding: Maaslands Antiquariaat, Maastricht).




```

10 REM ***DRAAIEN AARDE***
20 REM ***NAAM:AARDE***
30 SCREEN 9 : CLS
40 WINDOW (-2,-1.5)-(2,1.5)
50 PI=4*ATN(1) : PHI=25
60 SF=SIN(PHI*PI/180) : CF=COS(PHI*PI/180)
70 M=6
80 DIM A(M),B(M),CB(M),SB(M),U(M),V(M),
    U1(M),V1(M),W1(M)
90 DATA 0,45,3,40,9,40,12,45,9,50,3,50
100 FOR I=1 TO M : READ A(I),B(I) : NEXT I
110 A(0)=A(M) : B(0)=B(M)
120 FOR I=0 TO M : A(I)=A(I)*PI/180 :
    B(I)=B(I)*PI/180
130 CB(I)=COS(B(I))/SQR(2) : SB(I)=SIN(B(I))
140 NEXT I
150 FOR N=0 TO 720 STEP 3 : T=N*PI/180
160 CIRCLE (0,CF),.02
170 CIRCLE (0,0),1
180 REM ***BEREKEN NIEUWE POSITIES***
190 FOR K=1 TO M
200 A=A(K) : B=B(K) : SB=SB(K) : CB=CB(K)
210 ST=SIN(A+T) : CT=COS(A+T)
220 U1(K)=(ST-CT)*CB
230 V1(K)=-(ST+CT)*CB*SF+SB*CF
240 W1(K)=(ST+CT)*CB*CF+SB*SF
250 NEXT K
260 U1(0)=U1(M) : V1(0)=V1(M) : W1(0)=W1(M)
270 REM ***VERWIJDER VORIGE POSITIES***
280 FOR K=1 TO M
290 LINE (U(K-1),V(K-1))-(U(K),V(K)),0
300 NEXT K
310 REM ***MAAK NIEUWE POSITIES***
320 FOR K=1 TO M
330 IF W1(K)>0 THEN
    LINE (U1(K-1),V1(K-1))-(U1(K),V1(K))
340 NEXT K
350 REM ***UPDATING***
360 FOR K=0 TO M
370 U(K)=U1(K) : V(K)=V1(K)
380 NEXT K
390 NEXT N : END

```



Vervolgens stellen we ons voor, dat de bol met een constante snelheid om de z-as draait. In de formules kan dat bereikt worden door α te vervangen door $\alpha+t$, waarbij t een in hoekmaat uitgedrukte tijd is. Laten we t lopen van 0 tot 360, dan correspondeert dit met precies een omwenteling. In het bijgaande programma AARDE laten we een willekeurig gebied om de aarde draaien. Er is gekozen voor een eiland dat de vorm heeft van een zeshoek, met een grootte tussen Engeland en Australië in. Maar men kan met weinig moeite het programma uitbreiden voor een reeks van gebieden. Het is daarbij nodig de omtrek van een eiland of continent te benaderen door een gesloten veelhoek met, terwille van de nauwkeurigheid, een flink aantal hoekpunten.

De beschrijving van het programma is als volgt. In regel 50 wordt aan de hellingshoek θ de waarde 25 gegeven. Ook hier is het aan te bevelen om hetzelfde programma te laten werken met diverse andere waarden van θ . Sinus- en cosinusroutines kosten tijd. Het spaart daarom tijd om in regel 60 alvast $\sin\theta$ en $\cos\theta$ uit te rekenen. Uiteraard dient men te letten op de conversie van graden naar radialen.

We werken hier met een eiland van zes hoekpunten. We stellen het aantal hoekpunten van een gebied in het algemeen gelijk aan m . Zo kunnen we voor een ander gebied m een andere waarde dan 6 geven. Men lette er even op dat het hoekpunt met rangnummer m ook als een hoekpunt met rangnummer 0 wordt geteld. Dat is handig wanneer het programma later de zijden van het eiland als rechte lijntjes tekent.

Tijdens het stapsgewijs draaien dienen we telkens te beschikken over zowel de oude als de nieuwe posities van de hoekpunten van het eiland. Daartoe reserveren we in regel 70 wat geheugenruimte. De beginposities worden in de datalist $a(.),b(.)$ van regel 80 verenigd. Daarbij kan men voor een echt eiland de geografische lengte en breedte uit een atlas halen. In de regels 110-130 worden alvast enige constanten berekend die het programma verderop nodig heeft. De hoofdlus strekt zich uit van regel 140 tot het einde. We maken met de teller n een dubbele omwenteling in stapjes van 3 graden. De arrays $u(.),v(.),w(.)$ corresponderen daarbij met de geprojecteerde hoekpunten van de eerder berekende situatie. In de regels 180-230 berekenen we de overeen-

Verwondering

Altijd zijn nieuwsgierigheid en verwondering de belangrijkste drijfveren geweest voor wetenschappelijk onderzoek. Natuurlijk kwam er ook steeds een wedstrijdelement in: iedereen wilde de eerste zijn met een bepaalde ontdekking. Zelfs in het zo keurige Engeland van de vorige eeuw kwam diefstal van resultaten voor. Net als in grote delen van de sport is de wedijver sterk met geld verweven — maar ook dat is niet echt nieuw. De concurrentie ten spijt blijven verwondering en nieuwsgierigheid centraal staan; wie die niet in aan ziekelijk grenzende mate heeft, hoeft niet aan onderzoek te beginnen, die krijgt eenvoudig niet de ideeën die nodig zijn om aan de concurrentie mee te doen.

Die verwondering geldt niet alleen het onderzochte object, maar ook de uitkomsten en de staat van onderzoek. Daarbij stuit men steeds op twee tegengestelde verschijnselen, die zich laten illustreren met twee citaten uit het voorliggende nummer.

“Het wiskundige beschrijven van de afvoer van regenwater door ronde buizen is een van de moeilijkste problemen (. . .) Zelfs met computers kan het slechts tot een oplossing worden gebracht door de stelsels te schematiseren en door de wiskundige vergelijkingen die het verschijnsel beschrijven, te vereenvoudigen.” (J.B.M. Wiggers, *Riolering — wel en wee*, pag. 12)

“Een punt met een doorsnede van enkele atomen bevindt zich in een houder die in drie richtingen met grote precisie kan bewegen; deze nauwkeurigheid ligt in de orde van atomaire afmetingen.” (F. Meijer, *De nanometerdimensie — grensvlak tussen wetenschap en techniek*, pag. 48)

Het probleem van Wiggers is, zo blijkt uit zijn artikel, al enkele millennia lang praktisch heel adequaat opgelost. De moeilijkheden ontstaan wanneer we ook echt willen begrijpen wat ‘we’ al die eeuwen hebben gepresteerd — wanneer we, met andere woorden, een op zich goed functionerende oude techniek willen gaan omzetten in moderne technologie. Dan blijkt plotseling de werkelijkheid zo complex te zijn, dat we al heel blij mogen wezen als we al benaderend tot een praktisch bruikbare uitkomst komen. Dat wil zeggen tot een uitkomst die niet slechter is dan wat er al eeuwen gebeurt. Wel is er een heel ander soort kennis ontstaan, een soort waarop kan worden voortgebouwd. Het is mogelijk dat in de beginperiode als gevolg van de nieuwe aanpak kostbare fouten worden gemaakt (zoals in het geval van de verkeersbrug bij Zwolle, waar in het midden een knik zit, voorspeld door een ouwe rot in de weg- en waterbouwkunde die geen toetsenbord van een scherm kon onderscheiden), maar op den duur zal men met de technologie toch meer kunnen dan met de techniek.

De andere kant van de verwondering geldt de complexiteit van oplossingen. Een punt van atomaire afmetingen die beheerste bewegingen maakt in de orde van de afmetingen van een atoom? En dit nummer verschijnt niet eens op 1 april.



Riolering

W E L E N W E E

SIMULATICA

Onze eerste uitdaging is het verkrijgen op het beeldscherm van een afbeelding van de bol met een aantal breedtecirkels en meridiaancirkels. De wiskundig eenvoudigste methode om dit te bereiken, is de orthogonale projectie. Daarbij worden de punten (x,y,z) van de bol loodrecht op het beeldscherm geprojecteerd.

De transformatieformules zijn dan:

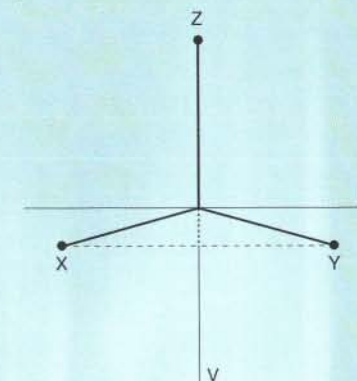
$$u = (-x + y)/\sqrt{2}$$

$$v = (-x - y) \sin\theta/\sqrt{2} + z \cos\theta$$

$$w = (x + y) \cos\theta/\sqrt{2} + z \sin\theta$$

Projecteren van een punt dat in x,y,z-coördinaten wordt gegeven, betekent niets anders dan dat we voor dat punt de coördinaten (u,v) moeten uitrekenen. De w-coördinaat hebben we eventueel

```
10 REM ***BREEDTECIRKELS EN MERIDIANEN***
20 REM ***NAAM: BOL***
30 SCREEN 9 : CLS
40 WINDOW (-2,-1.5)-(2,1.5)
50 RR2=1/SQR(2) : PI=4*ATN(1) : PHI=25
60 SF=SIN(PHI*PI/180) : CF=COS(PHI*PI/180)
70 CIRCLE (0,0),1
80 FOR I=-5 TO 5 : B=PI*I/12
90 SB=SIN(B) : CB=COS(B)
100 FOR J=0 TO 360 STEP 2 : T=J*PI/180
110 X=CB*(Y-X) : Y=CB*(Y-X) : Z=SB
120 U=RR2*(Y-X) : V=-RR2*SF*(X+Y)+CF*Z
130 W=RR2*CF*(X+Y)+SF*Z
140 IF W>0 THEN PSET (U,V)
150 NEXT J : NEXT I
160 CIRCLE (0,0),1
170 FOR K=0 TO 5 : A=PI*K/6
180 SA=SIN(A) : CA=COS(A)
190 FOR L=0 TO 360 STEP 2 : T=L*PI/180
200 X=CA*(Y-X) : Y=SA*(Y-X) : Z=CA*(Y-X)
210 U=RR2*(Y-X) : V=-RR2*SF*(X+Y)+CF*Z
220 W=RR2*CF*(X+Y)+SF*Z
230 IF W>0 THEN PSET (U,V)
240 NEXT L : NEXT K : END
```



We voeren nu een tweede coördinatenstelsel in, dat we vastgehecht denken aan het beeldscherm als projectievlak. De coördinaten noemen we u, v en w. Daarbij zijn u en v respectievelijk de horizontale en verticale beeldschermcoördinaten en staat w loodrecht op het beeldscherm. Zonder bezwaar kunnen we de oorsprong van het u,v,w-stelsel met die van het x,y,z-stelsel laten samenvallen. De samenhang tussen de twee coördinatenstelsels is bepaald door een zogenaamde lineaire transformatie met een orthogonale coëfficiëntenmatrix; aan ieder punt (x,y,z) op de bol koppelt deze matrix een punt (u,v,w). Deze matrix kiezen we zo eenvoudig mogelijk. We zorgen ervoor dat de z-as, de omwentelingsas van de aarde, wordt geprojecteerd als de v-as, en daarbij kiezen we een helling θ . De keuze $\theta=0$ betekent dat de aardas evenwijdig is aan het projectievlak. Met $\theta=\pi/2$ kijken we bovenop de noordpool. Verder geven we de x-as en de y-as een symmetrische positie ten opzichte van het midden als in de tekening op deze pagina geschetst.

nodig om te weten of het punt bij projectie zichtbaar is of niet. Een kleine meetkundige overweging maakt duidelijk dat $w>0$ het zichtbare gebied van de bol is en $w<0$ het onzichtbare. Het programma BOL vormt een breedtecirkel door een vaste waarde te kiezen voor de bolcoördinaat β en α te laten lopen over een traject van 360 graden, of 2π radiaal. In het programma kiezen we voor α een staplengte van bijvoorbeeld 2 graden. Voor elke waarde van α berekenen we eerst (x,y,z) en vervolgens (u,v,w). Wanneer $w>0$ vormen we een punt op het beeldscherm, voor $w<0$ onderdrukken we het plotten. Zo kunnen we punt voor punt een willekeurige breedtecirkel vormen als een ellipsvormige stippellijn. Aan het begin van het programma hebben we de hellingshoek θ van de rotatie-as de willekeurige waarde van 25 graden gegeven, maar het is leuk hetzelfde programma te herhalen met een andere waarde. Overigens tekent het programma via een lusstructuur een aantal breedtecirkels. Op gelijke wijze ontstaan de meridiaancirkels.

In het programma BOL worden de bolcoördinaten x, y en z vertaald naar de schermcoördinaten u, v en w. Het programma tekent de punten (u, v) alleen als w positief is.

SIMULATICA

Prof dr
H. Lauwerier

Cartografie

Nederland heeft een grote traditie in het maken van landkaarten. We hoeven ons slechts even de namen van Mercator, Ortelius en Blaeu voor de geest te halen, om daarvan overtuigd te zijn. Sindsdien heeft het handwerk van het maken van kaarten zich verder geperfectioneerd, en nu is dan tenslotte de computer ingeschakeld. Er komt heel wat kijken bij het maken van een bruikbare kaart die een afbeelding is van een bolvormig oppervlak op een vlak vel papier. We bekijken allereerst de loodrechte projectie van een bol op een plat vlak; in dit geval is dat het vlak van tekening dat samenvalt met het beeldscherm van de computer. Die bol, een model van Moeder Aarde, laten we draaien. We vragen ons af wat we bij projectie op het beeldscherm te zien krijgen wanneer we een eiland laten meedraaien dat door geografische co-

ordinaten wordt gegeven. Daarbij zorgen we er ook voor dat we alleen het zichtbare gedeelte van de aardbol afbeelden.

Uiteraard moeten we alles in coördinaten uitgedrukt. Daartoe bedienen we ons van twee Cartesische coördinatenstelsels. Het eerste systeem, een x,y,z-stelsel, zit aan de aarde vast. Alles kiezen we zo eenvoudig mogelijk: de oorsprong in het middelpunt van de aarde en de z-as langs de omwentelingsas. De straal van de aarde kiezen we als eenheid. Een willekeurig punt op de bol kunnen we dan beschrijven als:

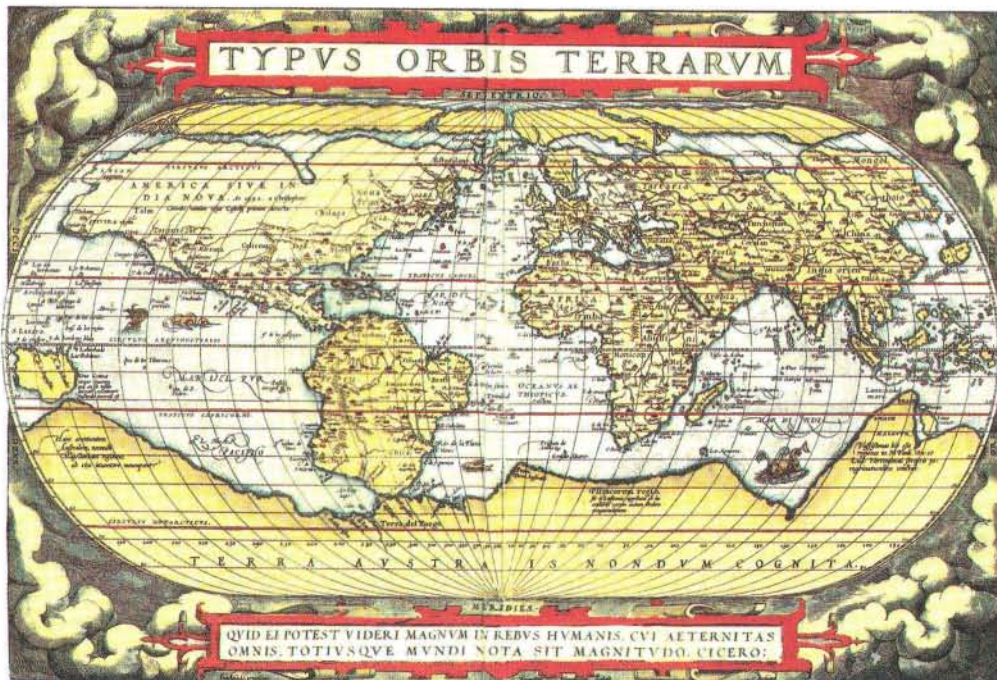
$$x = \cos\alpha \cos\beta$$

$$y = \sin\alpha \cos\beta$$

$$z = \sin\beta$$

In deze formules correspondeert α met de meridiaanlengte en β met de breedte. Voor $\beta=0$ krijgen we punten op de evenaar, voor $\beta=\pi/2$ de noordpool en voor $\beta=-\pi/2$ de zuidpool.

Een kaart uit een atlas van Ortelius toont op hogere en lagere breedtegraden aanzienlijke vertekeningen (afbeelding: Maaslands Antiquariaat, Maastricht).



Dankzij de riolering, een waar netwerk van buizen onder onze steden en dorpen, kunnen we afvalwater gemakkelijk en hygiënisch kwijt. Dankzij datzelfde stelsel krijgt de regen, waarmee we in het klimaat van de Lage Landen zo vertrouwd zijn, slechts zelden de kans om tot wateroverlast te leiden. In onze samenleving is riolering eenvoudig niet meer weg te denken. Toch is het hoog tijd om eens diep na te denken over de toekomst van deze voorziening. Want het profijt dat wij stedelingen ervan hebben, wrekt zich op het milieu. Daar komt het afvalwater uiteindelijk terecht, en ondanks intensieve zuivering bevat het nog altijd te veel schadelijke stoffen. Gelukkig verkeert een groot deel van de riolering in slechte staat. Nu we het stelsel toch moeten vervangen, kunnen we met een doordacht ontwerp het milieu best sparen.



Drie keer een riool van binnen. Het linker riool is door inspoeling van zand en veronachtzaamd onderhoud ernstig vervuild. Het middelste riool is geheel verzakt, waardoor de buizen schots en scheef liggen en de voegen niet meer op elkaar aansluiten. Daardoor is veel zand in het stelsel gekomen. Het rechter riool is slachtoffer van een ongelukje: er ging een heipaal door de buis.

J.B.M. Wiggers
Faculteit der Civiele Techniek
Technische Universiteit Delft

Riolering dient een tweeledig doel: zij maakt de inzameling en transport van afvalwater mogelijk en draagt zorg voor de goede afwatering van de bebouwde gebieden. Riolen hebben echter lang niet altijd die functies gehad. Voor de aanleg van de eerste rioleringen golden andere overwegingen. Menselijke afvalstoffen hadden namelijk handelswaarde. Uitwerpselen werden gebruikt als meststof, terwijl urine toepassing vond bij het looien van huiden en het verven van wol. Het riool speelde een belangrijke rol bij het vergaren van de kostbare drek.

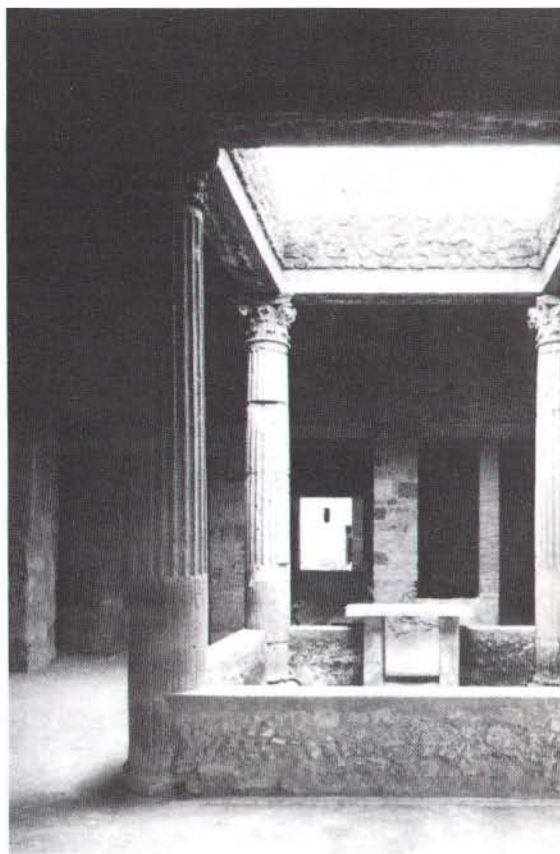
Al in de Oudheid legden veel volkeren met een hoog beschavingspeil riolering aan in hun steden. In geheel Azië en in het gebied van het Romeinse Rijk hebben archeologen rioleringssystemen gevonden. De Romeinen waren zeer bedreven in het aanleggen van drinkwater- en rioleringssystemen.

In Herculaneum, de stad aan de voet van de Vesuvius die tegelijk met Pompeï tijdens een uitbarsting werd begraven, voorzagen de inwoners in hun behoefte aan water door het te onttrekken aan riviertjes. Daarnaast gebruikten zij grondwater en regenwater dat zij in bekkens (impluvii) vergaarden. Bovendien voerde een aquaduct water aan uit de bergen. Deze vorm van openbare drinkwatervoorziening ontstond vermoedelijk pas nadat de Romeinen in 89 v.Chr. het bestuur van de stad overnamen.

Vrijwel elk huis in Herculaneum was voorzien van een toilet. De toiletten bevonden zich niet alleen op de begane grond, maar ook op bovenverdiepingen. Sommige huizen telden meerdere WC's terwijl enkele van de grotere huizen meerpersoonstoiletten bezaten. De uitwerpselen en de urine kwamen aanvankelijk in beerputten terecht. Na de aanleg van de openbare drinkwatervoorziening werden ze soms ook afgevoerd via de riolering. De huizen die daarop waren aangesloten hadden spoeltoiletten. De stad kende ook openbare spoeltoiletten.

Onder elke straat in Herculaneum lag een riool dat op de eerste plaats diende voor de afvoer van het afvalwater van toiletten en keukens en het overloopwater van vergaarbekkens voor regenwater en fontein. Het regenwater werd bovengronds, via de straat, afgevoerd; een hoogst praktische en economische oplossing.

De voorzieningen in Herculaneum kenden een niveau dat in vele moderne steden slechts



1

wordt geëvenaard. De stad Brussel bijvoorbeeld loost, evenals de Romeinse stad, een belangrijk deel van haar afvalwater nog steeds onbehandeld op het oppervlaktewater.

Primitieve voorzieningen

De omverwerping van het Romeinse Rijk door de invallende Germanen had op de waterbeschaving van die tijd een catastrofale uitwerking. Die beschaving werd in luttele decennia vernietigd. Vakkennis en vaardigheden werden niet meer overgedragen, bouwwerken vervielen tot ruïnes en de watervoorziening raakte in verval. De sanitaire voorzieningen werden gereduceerd tot hun meest primitieve vorm.

Afgezien van waterputten, kenden de middeleeuwse steden geen openbare drinkwatervoorziening en geen spoeltoiletten. De persoonlijke hygiëne stond op een zeer laag peil.

ACTUEEL

instraling van zonlicht daar een maximaal niveau bereikt. Het mechanisme dat ten grondslag ligt aan de vlekvorming zal dus waarschijnlijk samenhangen met de verwarming van atmosfeer.

De meeste planeetonderzoekers verklaren het ontstaan van de witte vlek met wolken die opstijgen uit de lagere atmosfeer en zichtbaar worden als zij door de verhullende lagen dringen. Daarmee zijn zij vergelijkbaar met de bekende cumulonimbuswolken in de Aardse atmosfeer. Naar het precieze mechanisme moeten we

nog gissen. Wellicht is de stijging van wolken het gevolg van de condensatie van water, eventueel samenhangend met een sterke opwaartse stroom van sublimerende ammoniakkorrels.

De sterkere winden in de hogere luchtlagen zorgen vervolgens voor de lengtegroei van de vlekken. Waarschijnlijk treden langs de randen van de vlek allerlei onregelmatigheden op, net als bij een melkvlek die zich in een kop koffie uitbreidt. Deze zijn echter moeilijk waarneembaar vanaf de Aarde. Mogelijk komt deze vlek

overeen met een enorme kern van een stormdepressie, net als de grote rode vlek op Jupiter, die al bijna 400 jaar zichtbaar is. Aangezien de witte vlekken op Saturnus een korter leven zijn beschoren - hooguit enkele maanden - is het zeer interessant om te gaan bestuderen hoe deze vlek precies zal verdwijnen. Daarmee verkrijgen we wellicht ook meer inzicht in de raadselachtige rode vlek op Jupiter.

(Persbericht ESO, München)

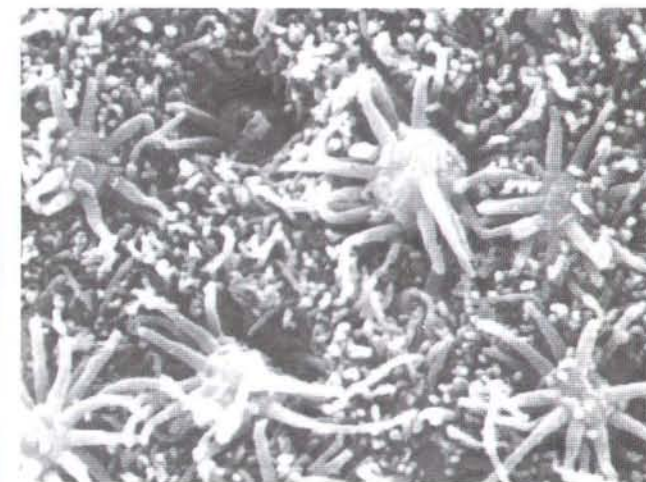
Bij de neus genomen

Tentoonstelling: 'Bij de neus genomen', Universiteitsmuseum. Biltstraat 166, Utrecht. Openingstijden: Op werkdagen van 10.00 tot 17.00 en op zondagen van 13.00 tot 17.00. Gesloten op zaterdag en feestdagen. De toegang is gratis. Vanaf het Centraal Station te Utrecht is het museum te bereiken met bus 4 en bus 11. Voor meer informatie kan men het museum bellen, tel. 030 - 73 13 05, vragen naar P.D. 't Hart of F. Smolders.

Deze maand hebben we goed nieuws voor mensen met een gevoelige neus. De geurtentoonstelling in het Utrechtse Universiteitsmuseum is voor de tweede keer verlengd. Men kan deze tentoonstelling nog tot 17 februari 1991 bezoeken.

Op de tentoonstelling 'Bij de neus genomen' kunnen bezoekers zelf van alles doen en ontdekken, bijvoorbeeld hoe moeilijk het is om geuren te herkennen.

Men heeft ook een steegje uit vroeger tijden nagebouwd. De geuren in dit steegje geven de bezoeker een beeld van de armoede waarin veel mensen vroeger leefden. Het is nauwelijks voor te stellen dat je aan die stank kon wennen. Toch begon de strijd tegen



Aroma of stank? Aan het oppervlak van het reukepitheel zorgen receptoren voor onze geurwaarneming (uit: Cellen, weefsels en organen. Natuur & Techniek 1989).

'ongewenste geuren' pas zo'n tweehonderd jaar geleden. Wie niet lekker rook, behoorde niet tot de nette standen.

Voor dieren is reuk van levensbelang. Een show van mannetjes-kakkerlakken maakt dit zeer duidelijk. De seksgeur van een vrouwtjes-kakkerlak veroorzaakt

nogal wat commotie. Is dat bij mensen misschien ook zo?

Vanwege de vele enthousiaste reacties en vragen om verlenging van de tentoonstelling, besloten de organisatoren Explorama en het Utrechts Universiteitsmuseum om de tentoonstelling nog even te laten voortduren. Tienduizenden bezoekers hebben er ondertussen al gekeken en geroken.

(Persbericht Universiteitsmuseum, Utrecht)

De witte vlek van Saturnus

Onlangs verscheen een zeer grote, witte vlek op de reuzenplaneet Saturnus, de vijfde planeet van ons zonnestelsel. Vermoedelijk woedt er een grote storm in de atmosfeer, veroorzaakt door het opwellen van wolken uit de lagere regionen naar de bovenste atmosferische lagen.

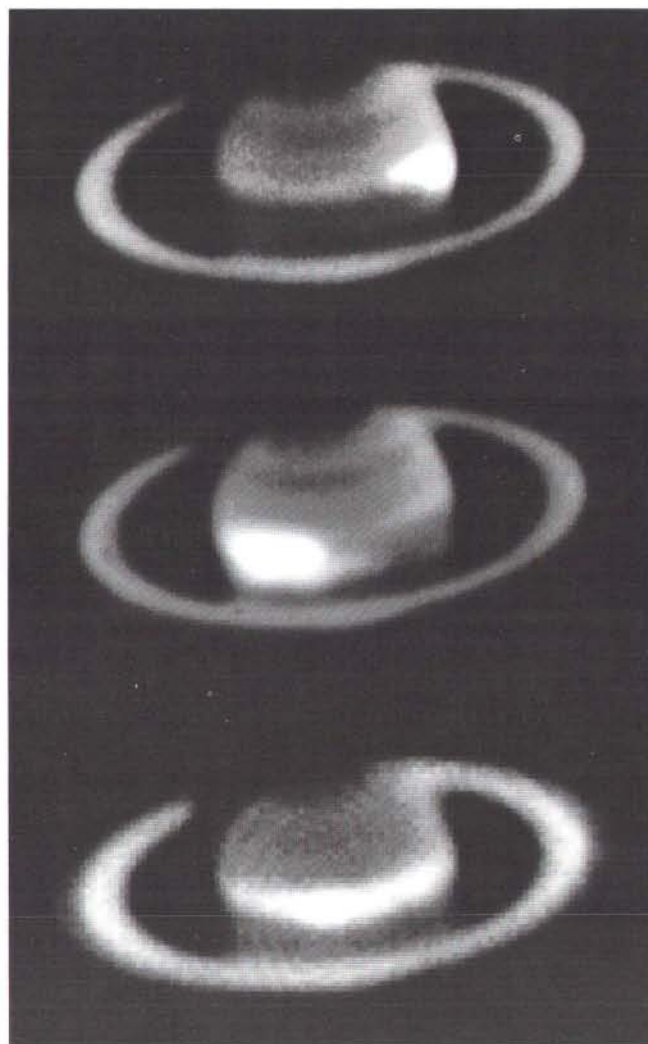
De vlek werd op 25 september voor het eerst waargenomen als een klein wit vlekje op het noordelijk halfrond. Op 2 oktober had de vlek al een grootte van ongeveer 20 000 km. Verdere waarnemingen gaven aan dat de vlek om Saturnus draaide in ongeveer 10 uur en 17 minuten. Dat is iets langzamer dan de omringende atmosfeer. Op 10 oktober had de vlek een lengte van ongeveer de helft van de zichtbare doorsnede van Saturnus en vervolgens groeide hij binnen twee weken uit tot een band die de gebieden rond de evenaar van de planeet bijna geheel omvat.

Sinds oktober 1990 houdt de Belgische astronoom Olivier Hainaut met enkele collega's de vlek in de gaten. Nog nooit eerder is zo'n grote vlek op Saturnus waargenomen.

De eerste melding van grote witte vlekken op Saturnus dateert uit 1876, waarna men nieuwe vlekken waarnam met een en opvallende regelmaat: in 1903, 1933 en 1960. Vreemd genoeg werden alle vlekken waargenomen op het noordelijk halfrond van de planeet.

Sinds de uitvinding van de astronomische telescoop aan het begin van de 16e eeuw heeft men uitgebreid de reuzenplaneten Jupiter en Saturnus bestudeerd. De laatste jaren is het aantal nauwkeurige waarnemingen toegenomen met het gebruik van ruimtesondes als de Pioneer en de Voyager.

Het oppervlak van Jupiter toont veel meer banden en vlekken dan Saturnus. Een verklaring hier-



Deze opnamen tonen, van boven naar beneden, de grote witte vlek van Sa-

turnus op 8 oktober, 16 oktober en 23 oktober 1990 (Foto: ESO).

voor gaat uit van de aanwezigheid in de atmosfeer van Saturnus van een dikke laag van aerosols (kleine vaste deeltjes) en mist (vloeistofdruppels). Deze onttrekken de turbulentie- en stromingspatronen aan het oppervlak van de planeet aan ons zicht.

De regelmaat waarmee de witte vlekken verschijnen, komt overeen met het Saturnus-jaar, de tijd die deze planeet nodig heeft om een omwenteling rond de zon te maken. De vlekken ontstaan telkens weer in de hoogzomer op het noordelijke halfrond, wanneer de



1. Dit impluvium in een Romeinse villa kwam in Pompei onder de as vandaan. Een impluvium is een vergaarbak voor regenwater. De bak bevindt zich op een binnenplaats die met een trechtvormig dak is overdekt.



2

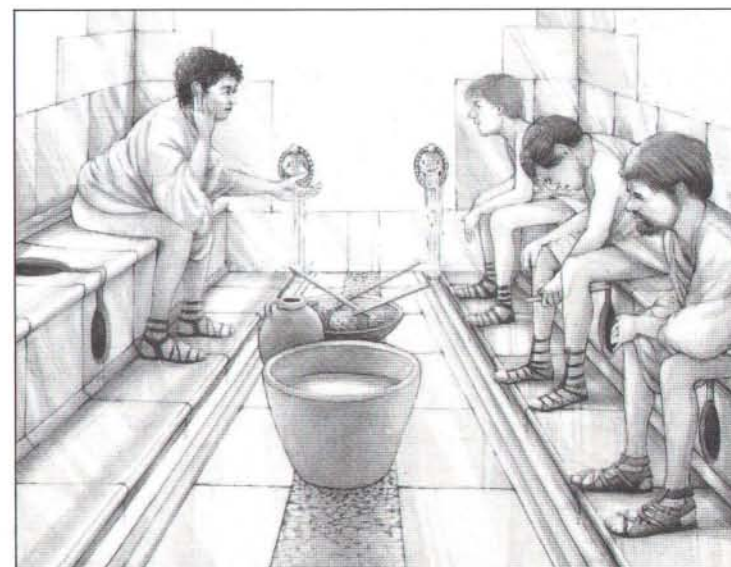
Als er al iets van riolering aanwezig was, dan toch zeer rudimentair. Amsterdamse decreten bijvoorbeeld, bevalen de inwoners herhaaldelijk het uit de woningen stromende water niet op straat te lozen, doch het onder de straat door te leiden naar de gracht.

Vanaf ongeveer het jaar 1600 raakte de ontwikkeling van de theoretische kennis over waterstroming en waterhuishouding in een ware stroomversnelling. In het midden van de vorige eeuw kon men op basis van rationele overwegingen rioolstelsels ontwerpen. Desondanks heersten op veel plaatsen nog tot in deze eeuw middeleeuwse toestanden.

Waardevolle mest

In de vorige eeuw begon men met de aanleg van riolering om straatvuil te kunnen wegspoelen. Straatvuil zorgde destijds voor een enorme stankoverlast en maakte de straten slecht begaanbaar. De riolering was echter vooral economisch van belang. Ook honderdvijftig jaar geleden hadden fecaliën handelswaarde, net als in de Romeinse tijd.

In vele steden zamelde de 'tonneman' de meststof in en verkocht die aan boeren en tuinders. Soms werd de vloeimest in een *poudrette*-inrichting gedroogd en verwerkt tot korrelvormige mest. Om het inzamelen te vergemak-



3

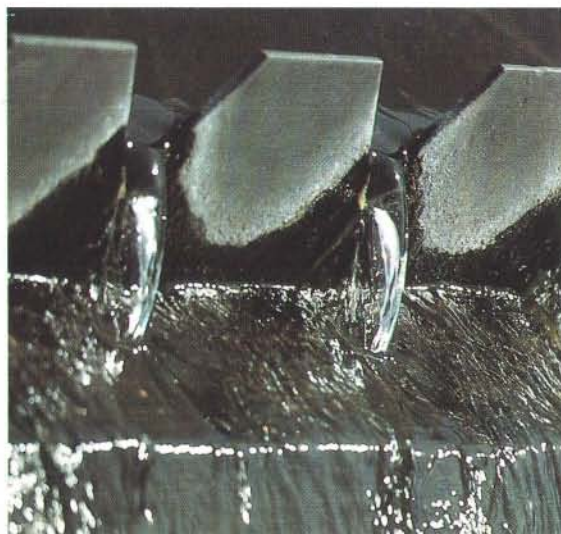
2 en 3. Tijdens opgravingen in Pompei en Herculaneum vonden de archeologen vele resten van de Romeinse watercultuur. De meeste huizen waren voorzien van een latrine (2). Enkele grote villa's hadden meerpersoonstoiletten.

kelijken werden in een aantal steden rioolstelsels aangelegd. Sommige daarvan waren bepaald ingenieus. Het best bekende voorbeeld is het zo genaamde *Liernur*-stelsel. Het kan beschouwd worden als de voorloper van de huidige vacuümriolering.

De spoeltoiletten werden bij het Liernurstelsel aangesloten op gietijzeren leidingen die in een verticale zigzagvorm onder de straat lagen. De leidingen mondden uit in een reservoir. Een stoommachine en een vacuümpomp konden in het systeem een onderdruk opwekken. Zodra de pomp in werking trad, zoog zij de fecaliën, die zich in de laagste punten van de leiding bevonden, naar het volgende punt. In de bovenste delen van de leiding bleef lucht aanwezig.

Zodra het reservoir aan het eind van de leiding volraakte, werd het met dezelfde vacuüm-

pomp geleegd in een tankwagen. De drek werd vervolgens rechtstreeks aan boeren en tuinders verkocht of afgevoerd naar een poudrette-inrichting. Het moge duidelijk zijn dat met behulp van het Liernurstelsel geen regenwater afgevoerd mocht worden: dat zou de mest teveel verdunnen. Het Liernurstelsel raakte in onbruik toen in het begin van deze eeuw chilisalpeter (nitraat) als meststof in de handel kwam.



6

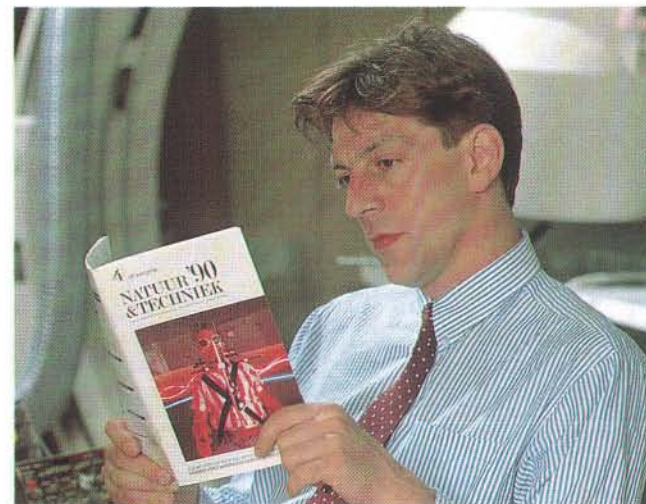


4

4, 5 en 6. Eigenlijk is een installatie voor de zuivering van rioolwater (5) niet veel meer dan een kunstmatige snelstromende rivier. De sterke beluchting (4) zorgt ervoor dat bacteriën de afvalstoffen kunnen afbreken. In de grote ronde bassins bezinken voor en na de beluchting zand en slib; het slib wordt in gesloten tanks vergist. Kraakhelder, maar niet ontdaan van alle verontreinigingen, verlaat het water de laatste zuiveringsstap (6).



5



TABEL Het testresultaat

	Leesbaarheid	Human Interest
EOS	55,22	9,24
Mens & Wetenschap	54,92	13,73
KIJK	51,36	15,87
Natuur & Techniek	46,62	6,08

de resultaten beïnvloed zijn door de manier van onderzoeken is niet groot. Van elk blad zijn zes artikelen uitvoerig geanalyseerd en daarbij is zorgvuldig in de gaten gehouden dat men vergelijkbare terreinen van de wetenschap koos.

Flesh heeft de kritiek die er vanaf het begin op zijn toets is geweest,

steeds serieus genomen en lang gezocht naar een verbetering. Hij meende dat hij die heeft gevonden in de toevoeging van de eerder genoemde Human-Interest-factor. Door beide resultaten te combineren zou de betrouwbaarheid van zijn test worden vergroot (in tegenstelling tot de leesbaarheidstest is de HI-component niet

aangepast aan de Nederlandse taal).

De resultaten van deze analyse ten aanzien van die Human-Interestfactor lijken dat te bevestigen. Ze komen beter overeen met hetgeen veel mensen intuïtief vinden van de vier populair-wetenschappelijk tijdschriften.

Natuur & Techniek en EOS scoren beide onder de 10. De aantrekkelijkheid die bij deze score past wordt aangeduid als 'eentonig'. Deze betiteling past bij wetenschappelijke teksten. Dat klopt redelijk bij de doelgroep van beide bladen.

Mens & Wetenschap en Kijk komen met hun HI-score terecht in de categorie tussen 10 en 20 en die wordt aangeduid als 'matig interessant'. Dat past volgens Flesh bij 'commerciële teksten'. Het is niet helemaal duidelijk wat hij daar mee bedoelt, maar in elk geval zijn die kennelijk levendiger dan wetenschappelijk teksten.

Het leesbaarheidsonderzoek van vier populair-wetenschappelijk teksten laat zien dat de klassieke leesbaarheidsformule van Flesh Douma soms tot minder betrouwbare resultaten lijkt te leiden. Dat is geen verrassende conclusie. De Human-Interest-test die hij later aan zijn methode heeft toegevoegd, geeft ogenschijnlijk betere resultaten.

(Jaap Willems)



Aleen Natuur & Techniek mikt op juiste doelgroep

Uit een analyse van vier Nederlandstalige populair-wetenschappelijke tijdschriften blijkt dat alleen Natuur & Techniek qua leesbaarheid aansluit bij de beoogde doelgroep. De andere drie zijn te gemakkelijk (EOS) of te moeilijk (KIJK en Mens & Wetenschap) voor hun lezers.

De Nijmeegse biologie-student Marcel aan de Brugh heeft onlangs een scriptie geschreven over de leesbaarheid van populair-wetenschappelijke bladen. Hij deed dat aan de Katholieke Universiteit Nijmegen, in het kader van zijn studie 'Populariseren van de natuurwetenschappen'. Het onderzoek stond onder leiding van dr Jaap Willems.

Aan de Brugh hanteerde bij zijn onderzoek de gebruikelijke Flesh Douma-test. Dat is een techniek om de leesbaarheid van teksten te meten aan de hand van zins- en woordlengte, vaak gecombineerd met de Human-Interestfactor. Om die laatste vast te stellen telde hij het aantal persoonlijke zinnen en dito woorden per blok tekst. Het resultaat van zo'n onderzoek is een getal dat een aanwijzing geeft. De ontwerper van de toets, Flesh, was zeker niet de laatste die toegaf dat zijn test niet meer is dan dat. De leesbaarheid of aan-

trekkelijkheid van een tekst is ook volgens hem nooit nauwkeurig aan te geven omdat allerlei factoren daarbij een rol spelen. Hij schreef ook dat "leesbaarheid niet gemakkelijk te definiëren is".

Sinds de introductie van de test in 1948 is ze echter al zo vaak gebruikt dat ze een grote autoriteit heeft verkregen; het benutten van deze test bij leesbaarheids-onderzoek is bijna vanzelfsprekend. Bovendien is er inmiddels enorm veel vergelijkingsmateriaal ontstaan. Ook mensen die de Flesh Douma-test bekritisieren, gebruiken haar.

In onderstaand lijstje zijn de meetresultaten uit het Nijmeegse onderzoek samengevat.

Een leesbaarheidsscore tussen 30 en 50 staat voor 'moeilijk' en dergelijke teksten dienen bestemd te zijn voor 'studenten van een universiteit'. Deze score is gangbaar in academische geschriften zoals studieboeken. Natuur & Techniek richt zich vooral op de hoogste klassen van HAVO en VWO en zit met de gevonden score dus redelijk in de buurt van haar doelgroep.

KIJK, Mens & Wetenschap en EOS komen met hun score terecht in de categorie 50 tot 60. Die wordt omschreven als 'tame-

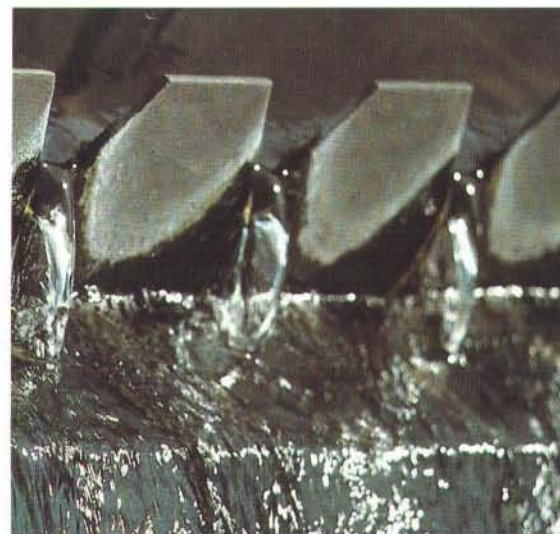
lijk moeilijk' en de doelgroep zou bestaan uit lezers met een HAVO- of VWO-diploma. KIJK en Mens & Wetenschap zeggen zich te richten op de jeugd en dat betekent dat de leesbaarheidsscore rond de 70 zou moeten liggen. Volgens de Flesh Douma-test zijn deze populair-wetenschappelijke tijdschriften dus te weinig populair. Ze zijn te moeilijk voor de beoogde doelgroep.

EOS zegt zich te richten op lezers met universitaire of HBO-opleiding. Deze doelgroep verwacht een leesbaarheid die in de buurt van die van Natuur & Techniek ligt. EOS haalt die bij deze analyse niet. Dit blad is te gemakkelijk geschreven voor haar doelgroep. Hoewel Natuur & Techniek dus het minst gemakkelijk leesbaar is van de vier, is er toch alle reden tot tevredenheid omdat het als enige goed aansluit bij de lezers waarvoor het is geschreven.

De analyse-resultaten kloppen niet met de subjectieve indruk die veel mensen hebben van de vier bladen. Natuur & Techniek wordt over het algemeen wel als het moeilijkst beschouwd, maar KIJK ziet menigeen toch als het gemakkelijkste populair-wetenschappelijke tijdschrift in Nederland. Hoe kan dat? De kans dat

Volksgezondheid en milieu

In de tweede helft van de vorige eeuw braken in veel Europese steden cholera-epidemieën uit. Engelse artsen legden als eersten een verband tussen de besmettelijke ziekte en de verontreiniging van het water door menselijke uitwerpselen. Lang niet elke deskundige was het daarmee eens. In 1870 woedde in de medische tijd-



schriften nog een hevige polemiek tussen diegenen die meenden dat cholera, net als griep, door de lucht werd verspreid en anderen die meenden dat het drinken van verontreinigd water de oorzaak was. De laatsten wonnen uiteraard het pleit.

Langzaam drong het besef door dat afvalwater systematisch zou moeten worden ingezameld en afgevoerd, om de cholera te stuiten. Aldus ontstond nog een reden om tot de aanleg van riolering over te gaan: de volksgezondheid.

Door de groei van de bevolking en de daarmee gepaard gaande verstedelijking, moesten gebieden bewoonbaar worden gemaakt die van nature ongeschikt waren voor stadsuitbreiding, bijvoorbeeld omdat ze te nat waren. Riolering bood uitkomst en ging, behalve voor de afvoer van afvalwater, een belangrijke rol spelen bij de effectieve afwatering van drassige gebieden.

De verstedelijking ging gepaard met industrialisatie en een aanzienlijke verbetering van de drinkwatervoorziening. Omdat het winnen van meststoffen uit de afgevoerde fecaliën economisch niet meer aantrekkelijk was, werd het gebruikte water tot afvalwater.

In de loop van de jaren dertig van onze eeuw raakten alle grote steden voorzien van uitgebreide rioolstelsels. Er was nu geen enkele belemmering meer om alles wat men kwijt wilde op het riool te lozen. De hoeveelheid verontreinigde stoffen in het afvalwater nam onrustbarend toe. Aanvankelijk was het zelfreinigende vermogen van de wateren waarop de riolering loosde veelal voldoende om de afvalstoffen te kunnen verwerken, maar in de jaren zestig was het op. Riolerings bleef een zegen voor de volksgezondheid, maar bleek een ramp voor het milieu.

Verontreiniging

Om het milieuprobleem het hoofd te bieden werd in 1970 de Wet Verontreiniging Oppervlaktewateren van kracht. Afvalwaterzuivering werd het parool en sindsdien kwamen overal installaties in gebruik die er nog steeds voor moeten zorgen dat het rioolwater zonder ernstige verontreinigingen op onze rivieren wordt geloosd. Nu, na twintig jaar, moeten wij vaststellen dat de hoge verwachtingen die de maatregelen wekten, slechts ten dele zijn uitgekomen. Het zuurstofgehalte en de helderheid van de meeste oppervlaktewateren zijn gelukkig toegenomen. Als gevolg van een overvloed aan fosfaten, nitraten en andere verontreinigingen, is de waterkwaliteit echter nog steeds beneden peil.

Bovendien blijkt inmiddels dat afvalwaterzuiveringsinrichtingen niet in staat zijn om microverontreinigingen tegen te houden. Er zijn meer dan 2000 stoffen bekend die als microverontreiniging vrijwel ongehinderd de zuivering passeren. Bij die stoffen horen onder andere zink, kwik, lood, cadmium, diverse chloorverbindingen en aromaten.

En, of de kommer nog niet groot genoeg is, ook de riolering draagt nog steeds royaal bij aan de verontreiniging van het oppervlaktewater. Rioolstelsels die afvalwater en neerslag via dezelfde buizen afvoeren, lozen bij een zware bui via de overstorten rechtstreeks op het oppervlaktewater. Gescheiden rioolstelsels voeren

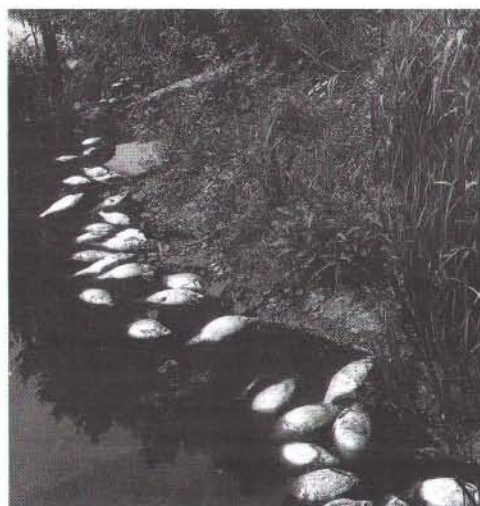


het regenwater rechtstreeks af, en met dat water alle vuil dat zich op straat en in goten heeft verzameld.

Overstorten worden om economische redenen in rioolstelsels aangebracht. Rioolstelsels zijn in het algemeen zo ontworpen dat een neerslag met een intensiteit van zestig liter per seconde per hectare kan worden afgevoerd. Om nu te voorkomen dat de diameters van de riolen stroomafwaarts steeds groter moeten worden, zijn op geëigende plaatsen ontlastpunten, overstorten, aangebracht. Als het rioolstelsel volloopt, verdwijnt het teveel aan neerslag via deze overstorten. Zodra er een zware bui valt, blijft een deel van het water tijdelijk op straat achter (zie afbeelding 17). De duur van dit verschijnsel en de hoeveelheid niet onmiddellijk afgevoerd regenwater zijn echter bij een goed uitgevoerd rioolstelsel gering.

Voor een gaaf rioolstelsel hebben we hiermee de milieu-ellende wel zo'n beetje gehad. Helaas is echter de conditie van de meeste riolen onrustbarend. Geleidelijk aan breekt het inzicht door dat lekkende riolen een aanzienlijke verontreiniging van de bodem en het grondwater veroorzaken. In Nederland en België is dit verschijnsel nog nauwelijks onderzocht. Enkele Duitse drinkwaterbedrijven overwegen echter al om onder stedelijke gebieden waar zich lekke riolen bevinden, de winning van grondwater voor de drinkwaterproductie geheel te stoppen. De economische gevolgen van die maatregelen zullen aanzienlijk zijn.

Er lekt niet alleen afvalwater naar het grondwater, ook het omgekeerde, het lekken van grondwater naar de riolering, komt voor. In België, Duitsland en Groot-Brittannië is waargenomen dat bepaalde riolen bij droog weer veel meer lekwater dan afvalwater transporteren. In Nederland zijn enkele gevallen bekend waarbij de lekwateraanvoer de droog-weeraanvoer evenaart. Het behoeft geen betoog dat de situatie hierdoor verslechtert. Een deel van de capaciteit van het rioolgemaal wordt nu immers benut om lekwater af te voeren. Hierdoor neemt bij een zware regenbui de hoeveelheid overstortend water toe en daarmee de verontreiniging van het oppervlaktewater. Het verdunde water is moeilijker te behandelen, waardoor het zuiveren van afvalwater onnodig duur wordt. Lekkende riolen ondermijnen daarnaast de fundering van wegen en gebouwen, doordat er veel grond in wegspoelt.



7



8

Kwaliteit en levensduur

Een riool gaat zestig tot zeventig jaar mee. Drie kwart van onze riolering is na 1945 aangelegd. In de eerste helft van de volgende eeuw zal er dus een ware vervangingsgolf optreden.

De kwaliteit van de riolering die werd aangelegd tussen 1945 en 1970, is in veel gevallen ronduit slecht. De buizen zijn overwegend gemaakt van inferieur beton. Ze hebben een lengte van één meter waar nu twee meter gebruikelijk is. Er komen dus veel meer voegafichtin-

Molekullen tot leven gewekt

Het ontstaan van het leven is voor de wetenschap nog steeds een van de grootste raadsels. Sinds Stanley Miller aantoonde dat simpele organische molekulen en aminozuren konden ontstaan in een oeratmosfeer, hebben vele onderzoekers geprobeerd uit te vinden onder welke omstandigheden eiwitten en nucleïnezuuren worden gevormd.

Met name het ontstaan van nucleïnezuuren stelt wetenschappers voor een probleem: wat was er het eerst, de kip of het ei. Bij de synthese van nucleïnezuuren fungeert een ander nucleïnezuur namelijk als voorbeeld. Enzymen die deze synthese katalyseren, worden op hun beurt gemaakt volgens de genetische code die in een nucleïnezuur ligt opgeslagen.

In 1989 werd de Nobelprijs scheikunde toegekend aan Thomas Cech en Sidney Altman voor hun opzienbarende ontdekking dat sommige RNA-molekulen katalytische eigenschappen bezitten. Deze verbindingen noemden zij

dan ook ribozymen. Door veranderingen in de gevonden ribozymen aan te brengen, verkreeg Cech bijvoorbeeld een stuk RNA dat andere brokken RNA aan elkaar koppelde.

Het ontstaan van biologische molekulen op de jonge aarde blijft echter nog steeds een raadsel. Biochemici werkzaam aan het Massachusetts Institute of Technology, hebben nu wellicht een tip van de sluier opgelicht. Door middel van eenvoudige molekulen proberen zij na te gaan, wanneer en hoe een verdeling is opgetreden tussen informatie-opslag (in nucleïnezuuren) en informatie-verwerking (door middel van de eiwitsynthese). Daartoe hebben zij een samengesteld molekuul gesynthetiseerd, dat dient als blauwdruk voor de vorming van dezelfde molekulen. De waterstofbindingen van nucleïnezuuren en de stikstofbindingen van eiwitten werden daartoe in het molekuul geïmiteerd.

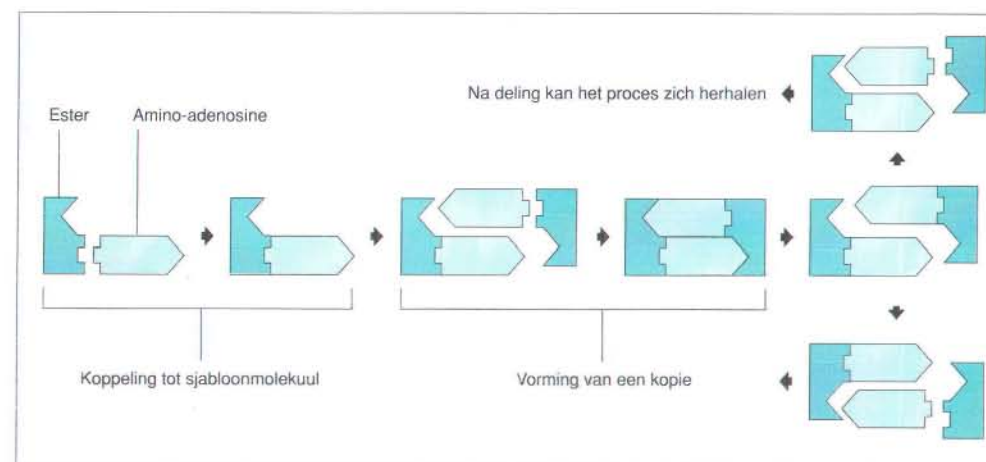
De uitgangsstoffen zijn een chemisch veranderd amino-adenosine en een pentafluorfenylester. In een trichloormethaan-oplossing vormde zich uit deze molekulen een amino-adenosine-trizuur-es-

ter. Deze verbinding werkt als mal en als enzym. Door middel van waterstofbruggen bindt een ester zich aan het adenosine-uiteinde en amino-adenosine aan het ester-uiteinde van het molekuul. De twee nieuwe bouwstenen koppelen snel via een stikstofbinding. De waterstofbindingen tussen de twee gelijke molekulen (mal en produkt) laten vervolgens los waarna twee volgende koppelingen kunnen optreden.

Het is de onderzoekers dus gelukt om een verbinding met nucleïnezuur- en eiwitkenmerken in een kunstmatige omgeving te laten 'leven'. Het begrip 'leven' is nu misschien wel toe aan een nieuwe definitie. Bovendien heeft het onderzoek aangetoond dat levende systemen op andere planeten mogelijk zijn zonder dat daarbij nucleïnezuuren of eiwitten een rol spelen.

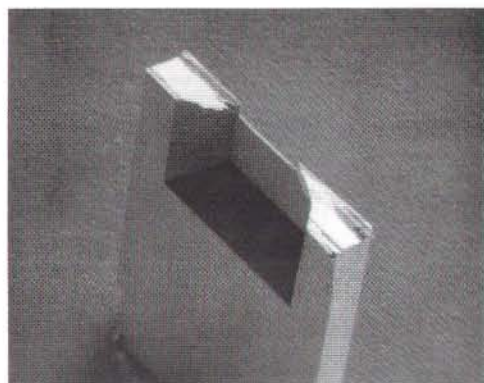
Uitgaande van de beschreven verbinding, willen de onderzoekers nu gaan proberen molekulen te maken die een soort eiwitsynthese nabootsen. Daarmee zou een volgende belangrijke stap in deze laboratoriumevolucie worden genomen.

(Bild der Wissenschaft)



heeft er nog weer heel wat extra. Dat zal steeds meer worden. Zolang de sensoren gescheiden zijn van de andere elektronica, zullen naar elke sensor draadjes moeten. "Op den duur krijg je zo ontzettend veel kabeltjes in een auto. Dat wordt kwetsbaar — denk eens aan een aanrijding — duur en technisch gecompliceerd." Na elke sensor komt immers andere micro-elektronica: versterkers, filters, onderdelen die ijken, die analoge in digitale signalen omzetten enzovoort. Bij auto's zitten dergelijke onderdelen nu in aparte kastjes onder de motorkap.

dit de bus-gedachte. "Onder andere in vliegtuigen loopt er al een enkele kabel, een bus, langs alle honderden sensoren die je in een vliegtuig hebt." Volgens Huijsing zal deze toepassing van sensoren een nieuwe fase in de automatisering veroorzaken. "Dit is automatiseren in engere zin, allerlei automatische functies toevoegen aan apparaten die die functies nog niet hadden. Bedrijven die hierop inspelen en sensoren en omringende elektronica op een enkele chip gaan zetten, zullen de markt gaan veroveren." Huijsing is Nederlander en



Een doorgebroken druksensor met rekstrookjes op een membraan. De hele chip is één millimeter breed, het membraan acht micrometer dik (foto: Sentron BV, Roden)

Huijsing pleit er voor op diverse plaatsen de elektronica op een enkele chip bij elkaar te brengen, de *geïntegreerde intelligente sensor*. Op den duur wordt het dan zelfs denkbaar om met een enkele kabel te volstaan in een auto, een kabel die van onderdeel naar onderdeel loopt. "Er gaan bijvoorbeeld tal van draden naar de diverse lampen, stadslucht, gewoon licht, groot licht, links, rechts, achterlichten, achteruitrijlichten, noem maar op. Je kunt je voorstellen dat er een enkele draad door de auto loopt en dat elke lamp besluit wel of niet wat stroom af te tappen." In de elektronica heet

hoopt dat ook Nederlandse bedrijven daarbij zullen zijn. Vandaar ook dat hij zijn kritiek redelijk zwaar aanzet. Zijn inaugurele rede van 9 november 1990 luidde: *Geïntegreerde intelligente sensoren. Of mist de Nederlandse industrie de automatiseringsboot?* Een gevolg van zijn waarschuwingen is in elk geval dat het bedrijf waar Huijsing zijn scherpste pijlen op richt, in beweging lijkt te komen. "Onlangs werden we gebeld door Philips Drachten, waar ze stofzuigers maken. Of we eens wilden komen praten."

NATUUR & TECHNIEK verschijnt maandelijks, uitgegeven door de Centrale Uitgeverij en Adviesbureau BV te Maastricht. Redactie en administratie zijn te bereiken op:
Voor Nederland:
Postbus 415, 6200 AK Maastricht.
Voor België:
Boechtstraat 15,
1860-Meise/Brussel.
Bezoekadres:
Stokstraat 24, 6211 GD Maastricht.
Telefoon: 0(0-31)43 254044 (op werkdagen tot 16.30 uur).
Telefax: 0(0-31)43 216124.

Advertenties:
H. Beurskens

Voor nieuwe abonnementen:
0(0-31)43 254044 (tot 20.30 uur, ook in het weekend).

Abonnementsprijs (12 nummers per jaar, incl. porto): f 120,— of 2350 F.
Voor drie jaar: f 285,— of 5585 F.
Prijs voor studenten: f 90,— of 1765 F.
Overige landen: + f 35,— extra porto (zeepost) of + f 45,— tot f 120,— (luchtpost).
Losse nummers: f 10,95 of 215 F (excl. verzendkosten).
Distributie voor de boekhandel:
Betapress BV, Gilze. Tel.: 01615-7800.

Abonnementen op NATUUR & TECHNIEK kunnen ingaan per 1 januari of per 1 juli (eventueel met terugwerkende kracht), doch worden dan afgesloten tot het einde van het lopende abonnementsjaar. Zonder schriftelijke opzegging vóór het einde van elk kalenderjaar, wordt een abonnement automatisch verlengd voor de volgende jaargang. TUSSENTIJDEN kunnen geen abonnementen worden geannuleerd.

De Centrale Uitgeverij is ook uitgever van DE WETENSCHAPPELIJKE BIBLIOTHEEK.
Door een lidmaatschap te nemen betaalt u voor elk boek een serieprijs die veel lager is dan de losse prijs. Voor inlichtingen: 0(0-31)43 254044.

Postrekeningen:
Voor Nederland: nr. 1062000 t.n.v. Natuur en Techniek te Maastricht.
Voor België: nr. 000-0157074-31 t.n.v. Natuur en Techniek te Brussel.

Bankrelaties:
Voor Nederland: AMRO-Bank NV te Heerlen, nr. 44.82.00.015.
Voor België: Kredietbank Brussel, nr. 423-907 0381-49.

7. Helaas leggen nog regelmatig vissen het loodje ten gevolge van een afvalwaterlozing. Vooral bij warm weer neemt de hoeveelheid zuurstof in vervuild water snel af, waardoor de vissen stikken.

8. Om te voorkomen dat een rioolstelsel ook zeer zware buien moet kunnen verwerken, past men overstorten toe. De buisdiameter in het stelsel kan zo beperkt blijven. Een groot nadeel van het systeem is dat er na een wolkbreuk ongezuiverd afvalwater in het oppervlaktewater terechtkomt.

9. Als een goed riool er eenmaal ligt, kan het heel wat jaren mee. Het leggen van de grote betonnen buizen heeft echter heel wat voeten in aarde. In de eerste helft van de volgende eeuw zal ons rioolstelsel grotendeels versleten zijn. Ook dan zullen weer heel wat straten op de schop gaan om het stelsel te kunnen vervangen.



9

gen in voor, die bovendien slecht zijn. Verder is de riolering vaak onzorgvuldig aangelegd. De problemen zijn nog verergerd door de toename van de verkeersbelasting en de aantasting van het beton door bacteriën die zwavelzuur produceren. De versnelling van de aantasting is te wijten aan de toename van zuurstof-verbruikende stoffen in het afvalwater, hogere temperaturen van het afvalwater, toename van het fosfaatgehalte en de lozing van anaëroob afvalwater uit persleidingen.

Het gevolg hiervan is, dat delen van de riool-

stelsels die na 1945 zijn aangelegd, en daarmee nog geen zestig jaar oud zijn, reeds moeten worden vervangen of gerepareerd.

Vervangen of opknappen

De afgelopen tien jaar zijn ingenieuze technieken ontwikkeld om defecte riolen op te knappen. Zo kan men de binnenzijde van het riool voorzien van een laag kunststof. Zo'n laag kan uit één stuk bestaan ('kous') of uit losse schaaldelen. Men kan ook een nieuwe leiding van

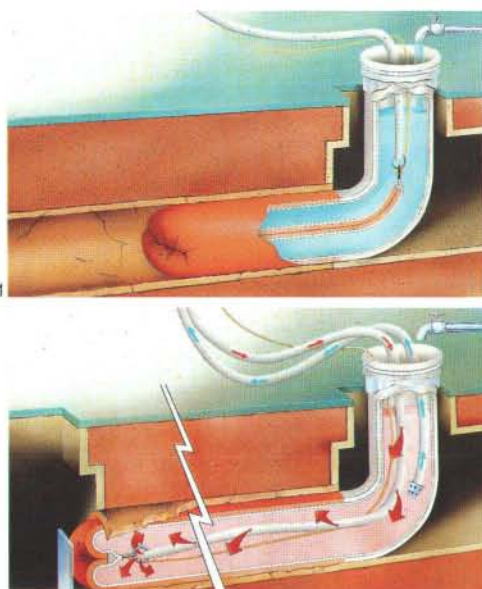


10

kleinere diameter aanbrengen binnen het defecte riool. Het materiaal van zo'n leiding kan kunststof, gres (gebakken klei) of asbestcement zijn. Een derde methode is het zogenaamde mollen: het van binnenuit breken en naar buiten drukken van de defecte buizen. Het werktuig dat zich door de buis beweegt en die breekt, trekt meteen een nieuwe buis achter zich aan.

Al deze methoden hebben een belangrijk bezwaar: ze sluiten de zijtakken af. Het herstellen van deze huis- en kolkaansluitingen is een moeizame en kostbare opgave. In het algemeen zijn bovengenoemde methoden duurder dan het aanleggen van een nieuw stelsel. In drukke straten of op ontoegankelijke plaatsen is renovatie echter een interessante oplossing. Het overgrote deel van de Nederlandse en Belgische riolering zal gewoon worden vervangen, maar dan wel volgens een hedendaags ontwerp.

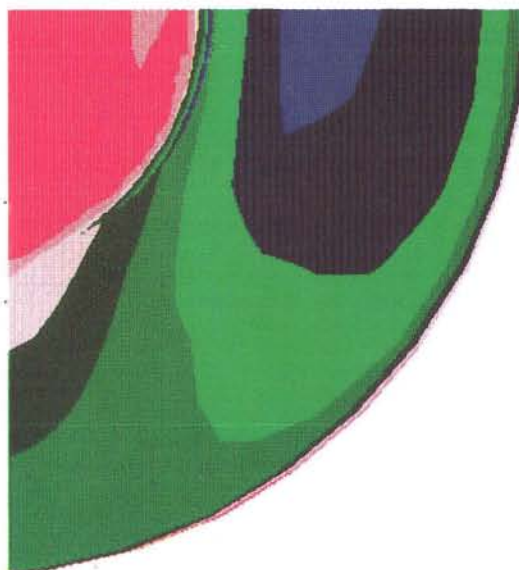
Naar schatting hebben de gezamenlijke Nederlandse gemeenten — gegevens met betrekking tot de riolering in België staan niet ter beschikking — vijftigduizend kilometer riolering in beheer; dat is meer dan eenmaal de aardbol rond. De vervangingswaarde van dit rioolstelsel ligt tussen vijftig en zestig miljard gulden. Globaal gezien moet tot aan het jaar tweeduizend zo'n vierhonderd miljoen gulden per jaar



12



14



Een computersimulatie van de luchtstroming over de windmeter. De kleine schijf bevat de sensor, de grote is de geleidingschijf

Deze temperatuursensor is eigenlijk een temperatuur-gevoelig elektronisch circuit (foto's: TU Delft)

een stuk of vijf in. Een die signaleert of de deur dicht zit, een die de temperatuur van het water meet, een die de hoogte van het water meet en nog een paar. Maar er is meer mogelijk. Je kunt denken aan sensoren die naar het wasgoed kijken, die het volume en het gewicht meten en die kijken of de was wit dan wel gekleurd is."

In het kader van het Europese technologie-programma Eureka, wordt onder de naam Prometheus gewerkt aan de ontwikkeling van nieuwe sensoren voor de auto. "Er zijn tal van sensoren die de bestuurder kunnen assisteren. Zo kun je denken aan sensoren die een overstekend persoon signaleren, die waarschuwen als je te dicht bij de vangrail komt en zelfs aan sensoren die een afbeelding van een waarschuwingsbord op je voorruit of je instrumentenpaneel projecteren. Er is op dit gebied van alles denkbaar. Ik reed pas in Amerika in een Ford Thunderbird die automatisch inhield als je dichter dan vijf meter bij een andere auto in de

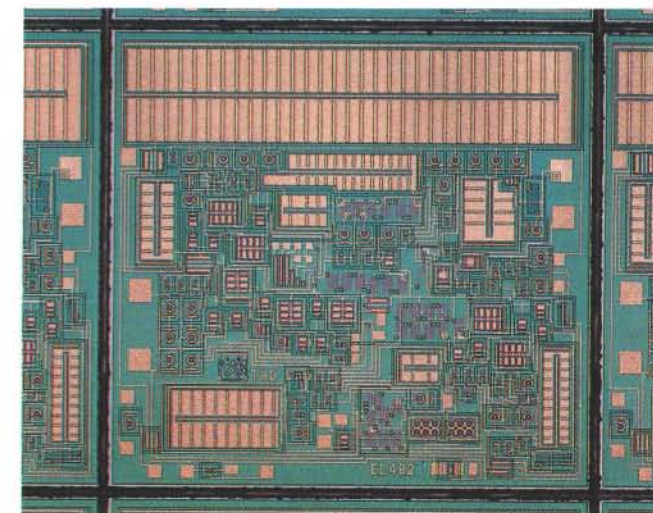
buurt kwam. Bij Ford in Detroit hebben ze een grote en zeer goede sensorgroep, hoor. Net als bij Toyota trouwens."

Gescheiden werelden

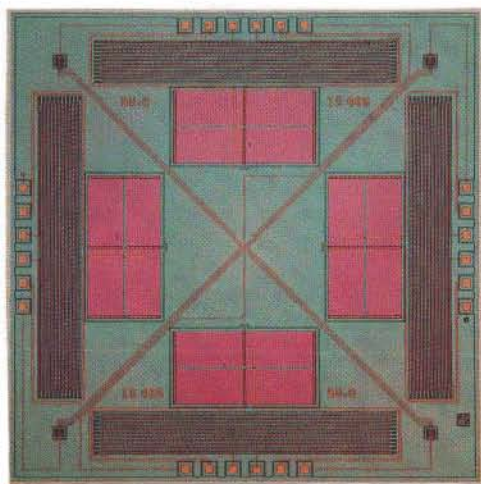
Sensoren zijn in de wetenschap niet nieuw. Huijsings collega in Delft, de hoogleraar elektronica dr S. Middelhoek, wees al in het begin van de ja-

ren tachtig op het belang ervan, net als diens broer — de helaas onlangs overleden Twentse hoogleraar dr J. Middelhoek. De nieuwe invalshoek van Huijsing is om sensoren en micro-elektronica te combineren. "Nu nog zijn het twee gescheiden werelden. Enerzijds heb je de wereld van de micro-elektronica en de chips en anderzijds heb je de sensoren. Dat merk je ook in het bedrijfsleven; tot nu toe had je bedrijven die chips maakten en bedrijven die sensoren produceerden." Volgens Huijsing gaan beide werelden samen. Sensoren zullen steeds vaker op een enkele chip komen samen met alle elektronica die de sensor-informatie verwerkt en die chips zullen door een enkel bedrijf worden geproduceerd.

Om diverse redenen zal dat noodzakelijk worden. Huijsing geeft het voorbeeld van een auto. Nu al zitten daar tien à twintig sensoren in. Alleen al om de automotor schoon en zuinig te laten functioneren, zitten er een stuk of tien sensoren in en een auto met een automatisch anti-blokkeersysteem voor de wielen, ABS,



over sensoren verschijnen, zowel bij de industrie als bij universiteiten. Dat ontloopt elkaar niet veel. Kijkt Huijsing echter naar Nederland, dan blijkt dat het aantal publikaties vanuit de Nederlandse industrie ver achterblijft. Het schrijnendste voorbeeld van industriële sufheid ten aanzien van sensoren vindt Huijsing Philips. "Philips was nota bene een van de allereerste bedrijven ter wereld met een sensor. Al in 1968 had Philips



De sensor van de windmeter. De chip wordt verhit en meet de temperatuurverdeling die tengevolge van de luchtstroom ontstaat

een drukopnemer op een chip. Alleen is het daar helaas bij gebleven. Philips heeft nooit systematische sensorontwikkeling gedaan, er is geen sensorgroep bij het Nat-Lab. De Europese concurrenten zoals Siemens en Thomson hebben wel sensorgroepen en de Japanners lopen op dit gebied helemaal voorop. Het is doodzonde. Philips zou dit zo goed kunnen. Ze hebben alle kennis in huis."

Wit of gekleurd

Er zijn tal van toepassingen te bedenken voor sensoren. In bijna alle gevallen leidt dit tot

apparaten die aantrekkelijker zijn voor de consument. "Neem zoiets simpels als een gasformuis. Daar kunnen allerlei sensoren in. Je kunt bijvoorbeeld in de gaspitten sensoren aanbrengen die voelen of er een pan op staat. Staat er geen pan op, dan kunnen ze het signaal geven dat het vuur uit moet. Zo bespaar je energie. Je kunt infrarood-sensoren aanbrengen die voelen of een pan te heet wordt en die dan het gas of de elektriciteit uitzetten. Daarmee voorkom je brand of droogkoken. In Amerika zag ik pas magnetronovens waarbij een naald met een draadje zat. Dat

naaldje was een thermometer die je in gerechten moest steken en waarmee het kookproces kon worden gevolgd. Dat is heel nuttig. Natuurlijk was het een Japanse oven."

Een ander voorbeeld is de stofzuiger. Ogenscheinlijk is dat een apparaat dat technisch af is. Het tegendeel is volgens Huijsing waar. "Het is bijvoorbeeld denkbaar om sensoren te ontwikkelen die de stofzuigkracht constant houden. Vooral wanneer je van het ene naar het andere oppervlak overschakelt, zuigt de stofzuiger zich wel eens vast. Dat kun je voorkomen met zo'n sensor. Als ik me niet vergis heeft Miele er al een dergelijke sensor in. Daarnaast kun je aan een sensor denken die meet of de stofzak vol is of niet. Dan hoeft je de stofzuiger niet open te maken. Je kunt op den duur zelfs denken aan stofzuigers die zelf de kamer zuigen en keurig om een vaas heen gaan zonder deze om te stoten."

Ook de wasmachine leent zich voor veel meer toepassingen van sensoren. "Er zitten er nu



13

in de vervanging en verbetering van de bestaande riolering worden gestoken. Na het jaar tweeduizend loopt dit bedrag op tot een miljard gulden per jaar. Daar komen de normale exploitatiekosten nog bij. Die zullen na de eeuwwisseling ongeveer driehonderd miljoen gulden per jaar bedragen. Gemiddeld verdwijnt er dan jaarlijks een slordige 1300 miljoen gulden in het riool; per woning komt dat neer op ruim f 260,- (5200 F) per jaar.

Naast de openbare riolering treffen we ook riolering aan in beheer bij particulieren. De lengte daarvan bedraagt circa twintigduizend kilometer. Dit stelsel heeft een vervangingswaarde van vier tot zes miljard gulden.

Om onze steden bewoonbaar te houden kunnen we riolering niet missen. We moeten echter af van de schade die ons afvalwater, via het riool, toebrengt aan het milieu. Nu we een ware vervangingsgolf voor de boeg hebben, kunnen we zó renoveren dat we de kool en de



15

10 t/m 15. Bij één van de technieken voor rioolrenovatie maakt men gebruik van een textielen kous die met kunsthars is geïmpregneerd (10). De kous keert zich in het riool binnestebuiten (11) door hem vol te laten lopen met

water. Door het water tot 80°C te verhitten (12) hardt de hars uit. Met een boor opent men daarna de aansluitingen weer. Als het geen bezwaar is om een flinke put te graven, kan men een nieuwe, kleinere buis in het oude riool schui-

ven (13). Bij riolerings die groot genoeg zijn om erin te werken, kunnen schaaldelen aangebracht worden (14). Dat zijn kunststofplaten waarmee ook niet ronde riolen (15) kunnen worden bekleed.

geit sparen. Dat is alleen mogelijk als we met drastische maatregelen de vuiluitworp uit de zuiveringsinstallaties en uit de riolering verminderen.

Regenwater op straat

De afvoer van regenwater via de riolering is een kostbare aangelegenheid. Nu er de komende decennia grote delen van de riolering aan vervanging toe zijn, is het zaak te zoeken naar vermindering van de kosten van heraanleg. Een van de manieren is het effectiever gebruik maken van de straat als bekken om water tijdelijk te bergen. De nieuwe rioolbuizen kunnen dan veel kleiner van diameter zijn dan de huidige.

De straten in een stad vormen ongeveer de helft van het verharde oppervlak waarvan regenwater moet worden afgevoerd. Daken vormen ruwweg de andere helft. Onverharde oppervlakken (tuinen, parken en plantsoenen) nemen praktisch al het water dat erop terecht komt zelf op. Trottoirs liggen ongeveer twintig centimeter hoger dan de straat. Een bui die in korte tijd 100 mm neerslag brengt, kan dus geheel tussen de trottoirbanden worden geborgen.

Zulke zware buien komen in Nederland en België zelden voor. De meeste buien kunnen vallen zonder dat de trottoirs overstromen en zeker zonder dat het water via bijvoorbeeld schrobputjes de woningen binnendringt. Het vloerpeil van woningen hoort namelijk tenminste dertig centimeter boven de kruin van de weg te liggen.

Zelfs in schijnbaar vlak terrein hellen straten echter enigszins. Daarom kan het bergen van regenwater op straat op lage punten problemen veroorzaken. Willen we regenwater groten-deels over straat afvoeren, dan moeten we daar rekening mee houden. Dat kan voorkomen dat er overstromingen ontstaan die te veel hinder en mogelijke schade opleveren.

Hemelwaterafvoer

Het wiskundig beschrijven van de afvoer over straat en het risico op overstroming, is geen eenvoudige opgave. Vrijwel alle beschrijvingen gaan uitsluitend van ondergrondse afvoer uit. Als er bij het doorrekenen van een rioelstelsel bij een bepaalde hoeveelheid neerslag capaciteitsproblemen blijken, worden de afmetingen

16. Niet alleen een versleten riool kost geld. We betalen ook belasting voor normale inspectie en onderhoud van de rioleringen.

17. Deze afbeelding geeft het principe weer van de berekening van overstroming en het verschijnsel 'water op straat' bij een zware regenbui. α is de af-

voer capaciteit van het stelsel. De ontwerpgrondslag is een afvoer van $60 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$. β is de neerslagintensiteit in mm h^{-1} .

18. Veel zuiveringsinstallaties beschikken over een regenwaterbassin, waarin een aardige bui kan worden geborgen. Het water wordt later gezuiverd.



16

van de leidingen vergroot tot de afvoer geheel ondergronds kan geschieden. Met deze aanpak omzeilt men het ingewikkelde hydraulische en rekentechnische probleem.

Het wiskundig beschrijven van de afvoer van regenwater door ronde buizen is een van de moeilijkste problemen uit de vloeistofmechanica. Zelfs met computers kan het slechts tot een oplossing worden gebracht door de stelsels te schematiseren en door de wiskundige vergelijkingen die het verschijnsel beschrijven, te vereenvoudigen. Als we daarbij ook de berging op en de afvoer via de straat in beschouwing nemen, wordt het probleem nog veel groter.

Lukt het allemaal, dan komt wellicht over enige tijd een produkt op de markt dat in de desbetreffende sector grote gevolgen kan hebben.

Een eerste aanwijzing dat de windsensor inderdaad industrieel interessant kan worden, is dat er binnenkort bij tuinders in het Westland een toepassing zal komen. Het bedrijf Priva uit het Zuid-Hollandse De Lier gaat de windsensor produceren. Dat de eerste toepassing in kassen voor de glastuinbouw en sierbloementeel zal plaats hebben, is niet toevallig. Huijsing: "In de eerste plaats heeft bijna iedere kas een windmeter. De glastuinbouw is uiterst innovatief. Men heeft daar een goed oog voor vernieuwingen. Men was er bijvoorbeeld snel bij met de computer. Veel kassen hebben tegenwoordig een com-

ANALYSE & KATALYSE

puter die regelt wanneer de ramen van de kas opengaan. Een windsensor is een logisch kunstmatig zintuig voor zo'n kascomputer."

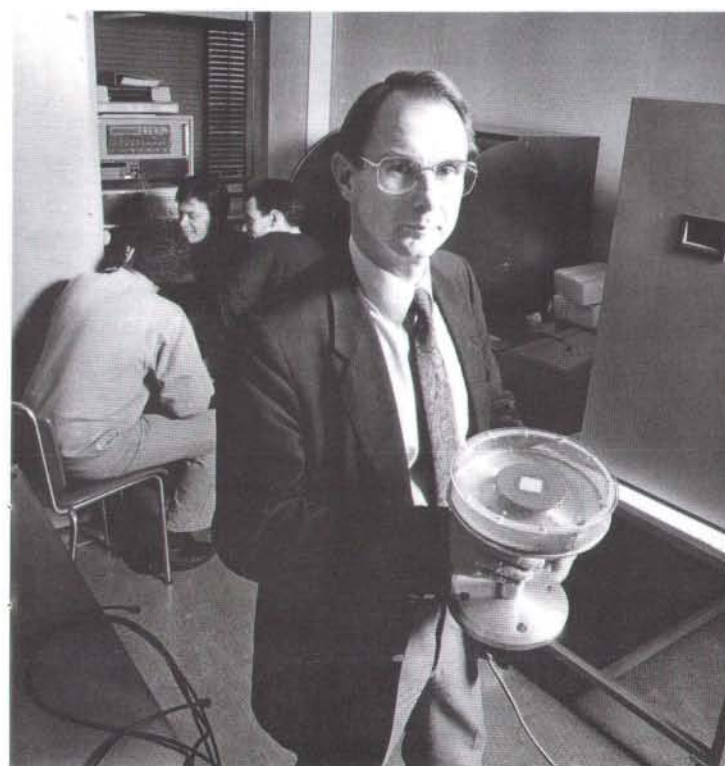
Een consequentie van de komst van de windsensor kan zijn dat de bedrijven die nu de mechanische windmeters produceren, op den duur zullen verdwijnen. Dat hoeft niet ernstig te zijn voor een land, mits er handig ingespeeld wordt op de nieuwe mogelijkheden. Immers, de banen en de welvaart die verloren gaan tengevolge van het verdwijnen van de bedrijven die mechanische windmeters produceren, zullen worden overgenomen

door de opkomst en bloei van bedrijven zoals het eerder genoemde Priva. Het wordt pas een probleem als de bedrijven die verdwijnen zich op een heel andere plaats bevinden dan de bedrijven die opkomen. En helaas gaat het vaak zo in de economische praktijk. Een belangrijk deel van de opkomst van Japanse bedrijven is bijvoorbeeld ten koste gegaan van Amerikaanse en Europese bedrijven.

Industriële sufheid

Huijsing is een wat schrale, keurige technicus, die een ogenblik stilte vraagt voor hij

"Het is doodzonde. Philips zou dit zo goed kunnen. Ze hebben namelijk alle kennis in huis"



zijn broodje met kaas eet en aan het eind van zijn inaugurele rede God dankt voor de zin die hij aan Huijsings leven geeft. Hij is op een wat ingewikkelde weg in Delft terecht gekomen. Eerst mulo, HTS en avond-HBS en uiteindelijk de technische universiteit.

Nu is hij dan hoogleraar en waarschuwt dat in de nabije toekomst bijna alle door de mens gemaakte voorwerpen vol sensoren zullen komen. Speelt de Nederlandse (en Europese) industrie daar niet voldoende op in dan zullen in de toekomst opnieuw tal van bedrijven en veel welvaart uit onze gebieden verhuizen naar Japan dat toch al — je hoeft maar naar prijskaartjes van de kleding van Japanse toeristen te kijken — zo welvarend is. Volgens Huijsing benut de Nederlandse industrie de mogelijkheden van sensoren in de verste verte nog niet. Hij heeft geteld hoeveel publikaties er in Japan, Amerika en Europa

DE OPMARS DER KUNSTMATIGE ZINTUIGEN

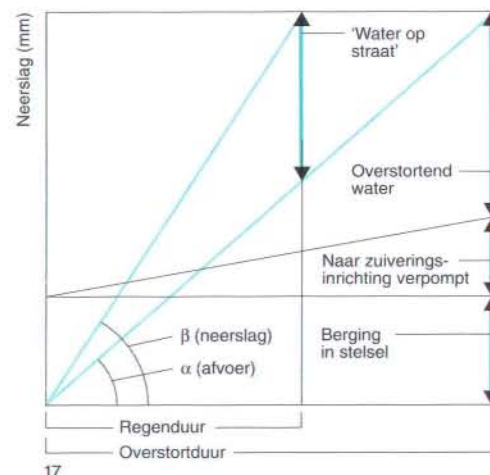
Hoogleraar elektronica Huijsing waarschuwt dat het oprukken van sensoren grote economische consequenties kan hebben

Een mens ruikt met zijn neus, hoort met zijn oren, ziet met zijn ogen, proeft met zijn mond en voelt met zijn huid. Wij hebben vijf zintuigen en ze zijn van groot belang voor ons functioneren. Missen we een zintuig, dan zijn we gehandicapt. Naast die vijf zintuigen zijn er nog meer. Verschillende dieren hebben bijvoorbeeld speciale zintuigen die wij niet hebben. Zo is een haai bijzonder gevoelig voor elektrische spanningen: hij kan op afstand de hartslag voelen van een prooidier dat onder het zand van de zeebodem verborgen is. En een duif is gevoelig voor het magnetisch veld van de aarde - dat is waarschijnlijk een belangrijk hulpmiddel bij het vinden van de weg terug naar het duivenhok. Ook steeds meer machines krijgen zintuigen, *sensoren* genoemd. Camera's aan de buitenkant van gebouwen functioneren bijvoorbeeld als kunst-oog voor het beveiligingssysteem en microfonen doen dienst als kunstmatige oren. Volgens dr. ir. J.H. Huijsing, sinds begin 1990 hoogleraar in de elektronische instrumentatie in Delft, zullen in de toekomst steeds meer appara-

ten "technische evenbeelden van de menselijke en dierlijke zintuigen" bezitten. Met dergelijke *kunstmatige zintuigen* zullen de machines steeds beter kunnen waarnemen. Ter toelichting zet Huijsing een constructie op tafel. "Dit", zo zegt de nieuwe hoogleraar, "is een windmeter." Het elektronische apparaat heeft geen bewegende delen en is op de faculteit der elektrotechniek ontwikkeld. Voor het meten van wind bestaan momenteel twee mechanische apparaten, een windvaan die de richting bepaalt en een soort windmolentje voor de snelheid. De windsensor van Huijsings vakgroep is een vlakke elektronische plaat. In het midden van die plaat wordt een hete plek opgewekt (elektrisch natuurlijk). Door de wind die over de plaat strijkt, verandert de hete plek van positie. Door te meten waar de plek naar toe verhuist, bepaalt men nauwkeurig zowel de richting als de snelheid van de wind. Huijsing wijst er op dat de windsensor zich nog in een ontwikkelingsfase bevindt en dat er nog enkele praktische problemen moeten worden

opgelost. Zo moet de sensor op een dusdanige wijze worden afgedekt dat sneeuw, regenval, zonnestraling en vallende bladeren niet hinderen.

Prof J.H. Huijsing met in zijn hand de nieuwe windmeter (foto: Hans Hordijk/Hollandse Hoogte)



18

Dankzij de moderne computer en doordat de laatste jaren de kennis van de stedelijke waterhuishouding aanzienlijk is toegenomen, hebben we nu zoveel greep op het probleem, dat we tot oplossingen kunnen komen die voldoen in de praktijk.

Het is zinvol te onderzoeken of we het regenwater, meer dan nu het geval is, vertraagd kunnen laten afstromen. De vuiluitwerp uit de rioolstelsels neemt daardoor af en een groter deel van het vervuilde regenwater kan in zuiveringsinrichtingen worden behandeld. De vertraging kan tot stand worden gebracht door het water tijdelijk te bergen in bekkens of, zoals de Ro-

meinen deden, deels op straat of daarnaast op te slaan.

Hoe kan het bovengronds geborgen water na de bui worden afgevoerd? Het is denkbaar dat in bepaalde gedeelten van de stad geheel wordt afgezien van een ondergronds regenwaterstelsel. Dan moet de straat het water afvoeren naar een reservoir, vanwaar het naar een inrichting voor de zuivering van regenwater wordt gevoerd. In andere gevallen zal het gebruik van een ondergronds buizenstelsel onvermijdelijk zijn. Om het bergings- en afvoer vermogen van het gehele afvoer- en zuiveringssysteem optimaal te benutten, zal regeling en besturing van de waterstromen noodzakelijk blijken.

Grote stukken riool moeten de komende decennia worden vervangen terwijl de verontreiniging van het oppervlaktewater door de rioleerflink, misschien wel helemaal, moet worden teruggedrongen. Het ligt voor de hand deze opgaven in nauwe samenhang tot een oplossing te brengen. Voor technici vormt het vinden van inventieve oplossingen een uitdaging; voor gemeenten en waterschappen wordt de vernieuwing een aanzienlijke financiële last.

Bronvermelding illustraties

DHV Raadgevend Ingenieursbureau BV, Amersfoort: pag. 2-3 links
Jansen Rioolreiniging, Hardinxveld: pag. 2-3 midden
Aannemingsbedrijf NBM, Wageningen: pag. 2-3 rechts, 14
Ministerie van Cultuur, Rome: 1 en 2
Loek Koopmans, Zwolle, uit: *Vita Nova*, Meulenhoff Educatief, Amsterdam: 3
Waterschap Zuiveringschap Limburg, Roermond: 4 (Grummer en Van Sloun), 5 (Airfoto Netten), 6, 7, en 18
Landbouw Universiteit Wageningen: 8 (G. Willemsen)
Hollandse Hoogte, Amsterdam: 9 (Piet den Blanken), 16 (Hans Aarsman)
Riooltechnieken Nederland BV, Delft: 10, 11 en 12
Ruud van Roon, industriële fotografie, Hoevelaken: 13
Grontmij Advies- en Ingenieursbureau NV, De Bilt: 15

J.W. Verhoeven
Laboratorium voor Organische Scheikunde
Universiteit van Amsterdam

Organische dioden en schakelaars

Sinds 1950 is de wereld van de elektronica flink in beweging geweest. Na de elektronenbuizen kwamen de transistoren. Deze werden steeds kleiner en we kunnen ze nu met duizenden terugvinden op de chip. Alhoewel men steeds meer schakelingen op een klein plakje silicium kan onderbrengen, is er een grens aan de verkleining van de structuren die men kan bouwen op een siliciumrooster. In de organische chemie is men inmiddels echter in staat om op moleculaire schaal vrijwel elke gewenste structuur te realiseren. Als organische molekulen bovendien kunnen werken als elektronische schakelingen, ligt daarmee een wereld vol mogelijkheden open voor een moleculaire chip.

Bij het onderzoek naar de geleiding binnen molekulen maken onderzoekers gebruik van lasertechnieken. Met laserlicht van een specifieke golflengte kan een elektron binnen een molekuul naar een hoger energieniveau worden gebracht.



de activiteit van bijvoorbeeld de hersenen. De PET-scan (9) is van een patiënt met een beschadigde linker-hersenhelft.



10

10. Beschadiging van bepaalde gebieden in de rechterhelft leidt tot verlies van het vermogen om de mededeling "Ik ga op reis"

de juiste emotionele stembuiging mee te geven. Verlies van dit vermogen betekent ook dat het slachtoffer ongevoelig wordt voor into-

naties in de spraak van anderen.

staande kunstcritici hun werk als buitengewoon creatief. Een dergelijk vermogen tot creatieve uiting ondanks rechtszijdig letsel doet veronderstellen dat de linker-hersenhelft een eigen bijdrage aan het tekenwerk levert. Uit bepaalde ziektegevallen komen inderdaad aanwijzingen dat de linkerhelft zorgt dat details natuurgetrouw worden weergegeven, terwijl de rechterhelft de ruimtelijke verhoudingen en het beeld als geheel helpt overzien.

De voorste hersenlobben werken ongeveer als een kunstenaar die telkens een ander specialistisch werktuig kiest uit de reeks die de hersenhelften hem bieden. Ook bij het aanspreken van kennis bundelen de hersenhelften waarschijnlijk steeds hun krachten. Voor hogere functies, en zeker voor prestaties op het allerhoogste niveau, is een samenspel tussen linker- en rechter-hersenhelft — tussen verbale en ruimtelijke of analytische en synthetische vermogens — onontbeerlijk. Dat wordt bereikt door voortdurende communicatie via het corpus callosum.

Dit gegeven maakt het split-brainsyndroom alleen maar geheimzinniger. Hoe bestaat het dat F.R. en de meeste van haar lotgenoten in grote trekken normaal konden lijken terwijl deze samenwerking bij hen onmogelijk was ge-

maakt, de spraak was afgesneden van de geloofwaardigheidstoets en het vermogen om onderdelen te analyseren was gescheiden van het waarnemen van ruimtelijke verhoudingen? De nieuwe bevindingen bepalen ook ons onderzoeksprogramma en ons doel, namelijk het beschrijven van de interactie tussen de hersenhelften. We willen achterhalen hoe dat samenspel leidt tot één verstand dat als één geheel functioneert en zijn hoogste potentieel bereikt.

Dit artikel verscheen eerder in het mei-juni nummer 1990 van *The Sciences*, een uitgave van de New York Academy of Sciences, en werd voor ons vertaald door mw. drs A. Veerman uit Amsterdam.

Literatuur

Christen Y, Klivington K. *Hersenen en Gedrag*. Maastricht: Natuur & Techniek, 1989.
Hubel DH. *Visuele informatie - Schakelingen in onze hersenen*. Maastricht: Wetenschappelijke Bibliotheek, Natuur & Techniek, 1990.

Bronvermelding illustraties

Reynold Brown, via de auteur: 50-51
Bristol Myers, uit: *Hersenen en Gedrag*: 6
KFA-Forschungsanlage Jülich, D: 8 en 9
NV Nederlandse Spoorwegen, Utrecht: 10
Tadanobu Tsunoda, Tokyo, uit: *Hersenen en Gedrag*: 11

man een loonsverhoging geeft. Daarna werd getest hoeveel de proefpersonen van het verhaal onthouden en begrepen hadden. Linkszijdig beschadigde en normale proefpersonen bleken het onzinnige detail of weg te laten of te normaliseren, dat wil zeggen, ze herinnerden het zich verkeerd zodat het nu wel goed bij de rest van het verhaal als geheel paste.

Daarentegen herinnerden patiënten met een rechtszijdig hersenletsel zich ieder afwijkend detail tot in de finesses, maar de clou van het verhaal ontging ze vaak. In plaats van de details op te offeren, zodat het grote geheel klopte, offerden ze het grote geheel op om de details in te kunnen passen. Meestal gaven ze irrelevante of ongeloofwaardige verklaringen van het stukje onzin: "de boer gaf zijn knecht meer loon als aanmoediging om harder te werken". Op grond van deze waarnemingen lijkt het mogelijk dat de rechter-hersenhelft beschikt over een soort 'geloofwaardigheidstoets' die informatie in een bepaalde context op juistheid beoordeelt en wat onzinnig is uitfiltreert.

De laatste jaren is gezocht naar directe bewijzen voor samenwerking tussen de hersenhelften, onder andere door meten van de hoeveelheid doorstromend bloed — net als in de spieren neemt die in de hersenen toe bij activiteit. Voor het goed oplossen van problemen waarvoor we beslissingen moeten nemen op grond van onze kennis, worden kennelijk veel gebieden in beide hersenhelften ingeschakeld. Bij zware taken moeten ze samenwerken.

Creatieve activiteiten vergen misschien het meest van de hersenen, maar toch bejubelt men in brede kring juist de rechter-hersenhelft in de mening dat deze in z'n eentje alle creatieve klusjes klaart. Onderzoek aan patiënten met hersenletsel suggereert echter dat creativiteit niet uitsluitend afhangt van één hersenhelft, maar van de voorste lobben van beide. Wel lijkt iedere hersenhelft een andere bijdrage aan het creatieve proces te leveren. Neuropsychologen



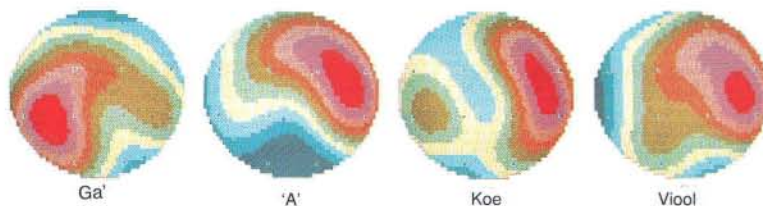
8

8 en 9. Met een PET-scanner kan men de verdeling van radioactief-gemerkte stoffen in het lichaam volgen. Dat verschaft inzicht in

9

proberen het creatief vermogen te schatten door bijvoorbeeld testen die gebruik maken van 'ontwerpvermogen' of 'spraakvermogen', waarbij iemand in een bepaalde tijd zoveel mogelijk dessins moet tekenen of woorden moet produceren. Uit deze proeven blijkt dat beschadiging van de rechtervoorlob vooral een nadelige invloed heeft op het bedenken van dessins en beschadiging van de linkerlob de verbale vaardigheid het meest aantast.

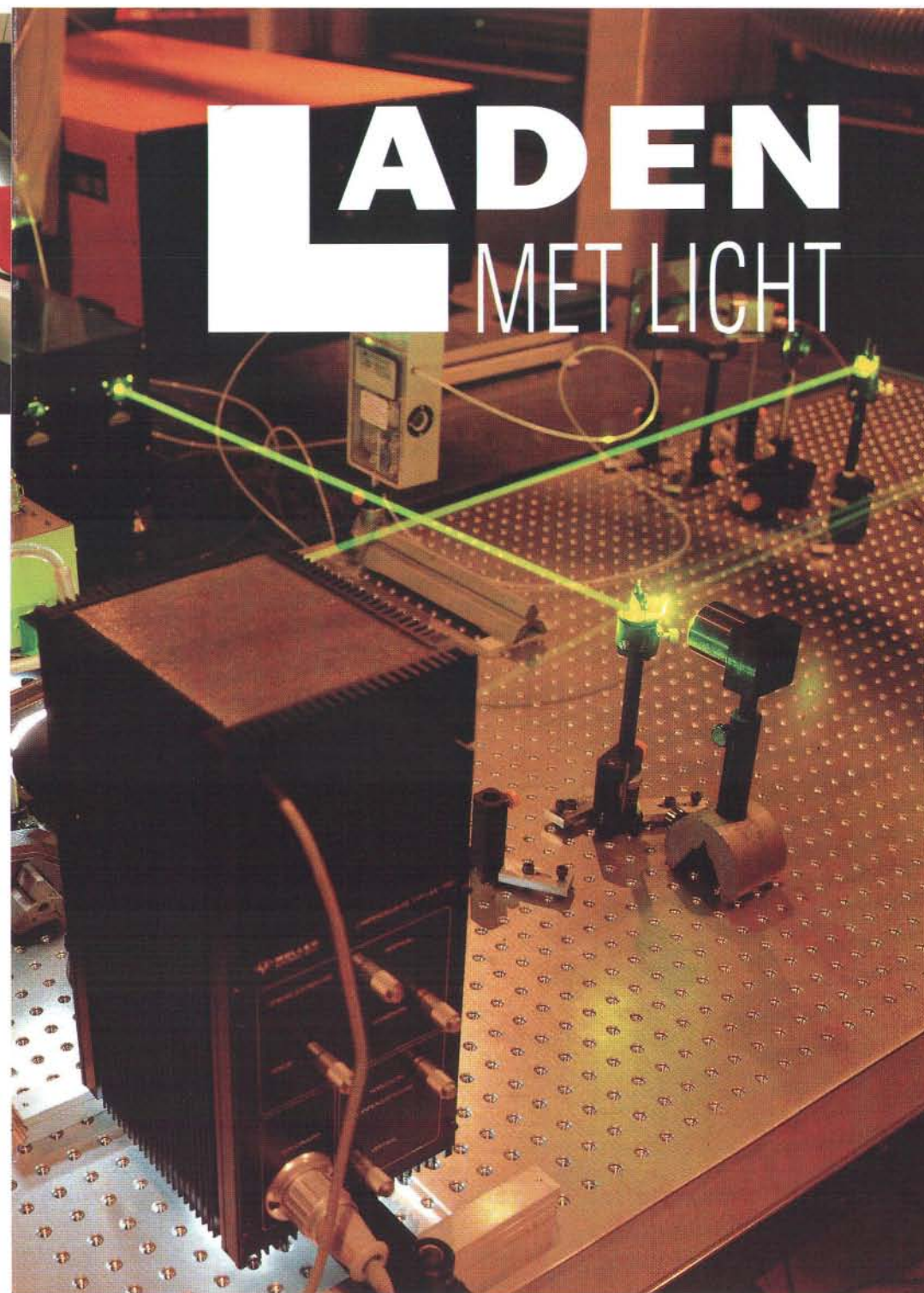
Desondanks blijkt er geen echt scherpe taakverdeling te bestaan. In mei 1988 hielp ik een kunstcollectie samenstellen voor het symposium *Kunst en de hersenen* in Chicago. De betrokken kunstenaars hadden allemaal door een ongeluk of ziekte hersenletsel opgelopen, waarbij in veel gevallen de rechter-hersenhelft beschadigd was. Toch beoordeelden vooraan-



11. Elektrische velden weerspiegelen de hersenactiviteit. Duidelijk blijkt dat bij het luisteren naar de lettergreep 'ga' andere delen ingeschakeld worden dan bij het luisteren naar de letter 'a', een koe of een viool.

11

LADEN MET LIGHT



Bij de term elektronica horen begrippen als weerstanden, gelijkrichters en transistoren; onderdelen die men in iedere radio en televisie kan aantreffen. Een weerstand geleidt met enige moeite een elektrische stroom, een gelijkrichter of diode laat een stroom slechts in één richting door en een transistor is een klein onderdeel dat werkt als versterker of schakelaar.

Sinds enige jaren onderzoekt men de mogelijkheid om molekulen te bouwen die overeenkomsten vertonen met elektronische componenten. Uit zulke molekulen zouden 'molekulairelektronische' circuits kunnen worden samengesteld met een graad van miniaturisatie, welke die van de huidige micro-elektronica overtreft. Bij de ontwikkeling van molekulen die ooit deel moeten gaan uitmaken van molekulairelektronische schakelingen, ligt het voor de hand om bestaande elektronische onderdelen als voorbeeld te hanteren. Ons onderzoek in Amsterdam heeft zich toegespitst op de synthese van moleculaire systemen die sterke overeenkomsten vertonen met dioden en schakelaars.

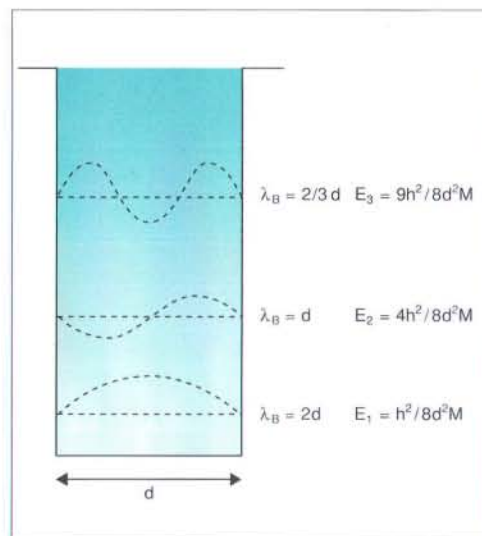
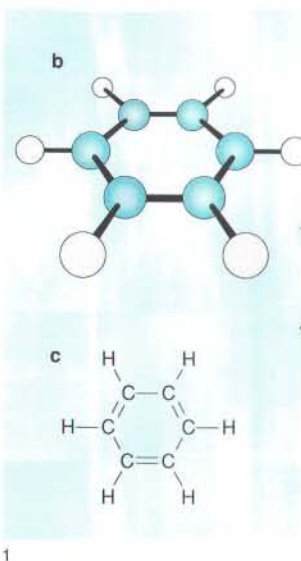
Elektronen en molekulen

Elektrische verschijnselen op moleculaire schaal hangen samen met het gedrag van elektronen in een molekuul. Elektronen kunnen in een molekuul verschillende hoeveelheden energie bezitten. Het verschil tussen twee energieniveaus komt overeen met de energie van een foton of lichteenheid. Voordat we ingaan op de problemen die optreden bij het sturen van elektrische verschijnselen op moleculaire schaal, is het nodig een beschrijving te geven van het gedrag van elektronen in molekulen en van hun interactie met licht. Daartoe verplaatsen we ons naar de microkosmos van (organische) molekulen.

Scheikundigen hebben zich met behulp van diverse indirecte technieken een beeld gevormd van het uiterlijk van molekulen. In afbeelding 1 is de structuur van het benzeenmolekuul op verschillende manieren weergegeven. In het *space-filling model* worden de atomen weergegeven als bollen. In het centrum van een bol bevindt zich steeds de - zeer kleine - atoomkern. Bovendien past vrijwel de volledige elektronenwolk van het atoom binnen deze bol. In zo'n model van benzeen overlapt de bol van elk koolstofatoom (C-atoom) sterk die

1. Een ruimtevullend model toont de elektronenwolk van het benzeenmolekuul (1a). In een ball & stick-model zijn de atomen door staafjes verbonden (1b). Het molekuul geeft men wel eens weer met dubbele en enkele bindingen (1c) alhoewel het tussen twee toestanden verkeert (1d). De zes elektronen die verspreid over het gehele molekuul voorkomen geeft men ook wel weer met een cirkel (1e).

2. Men kan molekulen beschouwen als een potentiaalput. Een elektron kan zich bewegen over een afstand d binnen een molekuul. Zijn golflengte moet een half aantal malen op d passen. Daardoor beschikt het slechts over scherp bepaalde hoeveelheden energie.



2

van twee naburige C-atomen en die van één waterstofatoom (H-atoom). Dit betekent dat elk C-atoom elektronen 'deelt' met twee andere C-atomen en met één H-atoom. Dit delen van elektronen komt in feite overeen met de covalente binding tussen de betreffende koolstof- en waterstofatomen en het zijn de covalente bindingen, die het molekuul als zodanig intact houden.

herkennen van gezichten, ook de linkerhelft dit probleem soms kan oplossen.

Een zeldzame afwijking in het herkenningsvermogen, bekend als *prosopagnosie*, benadrukt dit punt. Als een beroerte of andere hersenziekte een specifiek weefselgebied achter in de hersenen beschadigt, dan is het slachtoffer soms zelfs niet in staat het gezicht van een gezinslid of goede bekende te herkennen. Deze handicap is volstrekt specifiek. Iemand met prosopagnosie kan dezelfde persoon wel nog aan de stem herkennen, en kan kenmerkende onderdelen van het gezicht beschrijven (blauwe ogen, rimpelig voorhoofd), terwijl ook gewone, alledaagse voorwerpen herkenbaar blijven.

Mogelijk vormt de beschadiging van het cruciale hersengebied in de rechterhelft de voornaamste factor in de ontwikkeling van prosopagnosie. Toch is de afwijking zelfs bij rechtszijdig letsel niet altijd blijvend, als het overeenkomstig gebied in de linkerhelft tenminste intact gebleven is. Het lijkt alsof de linkerhelft bepaalde eigen, maar in onbruik geraakte herkenningsmechanismen bezit, en deze na enige tijd weer kan activeren. Hierbij spelen de specifieke

gelaatstreken waarschijnlijk een grotere rol dan de algehele indruk van het gezicht. Het vermogen om andere mensen te herkennen kan hierdoor soms langzaam terugkeren.

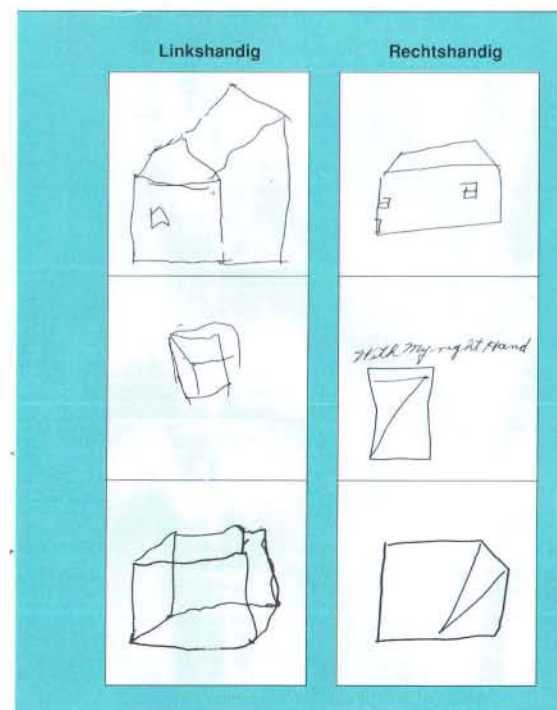
Diverse onderzoeksresultaten steunen de theorie dat de hersenhelften gewoonlijk samenwerken, zelfs bij taken die vroeger tot het exclusieve werkterrein van één van beide helften werden gerekend. Al sinds de negentiende eeuw is bekend dat de neurologische mechanismen die aan de spraak ten grondslag liggen zich bij vrijwel alle rechtshandige mensen in de linker-hersenhelft bevinden. Toch speelt ook de rechterhelft een rol bij het voortbrengen en begrijpen van spraak.

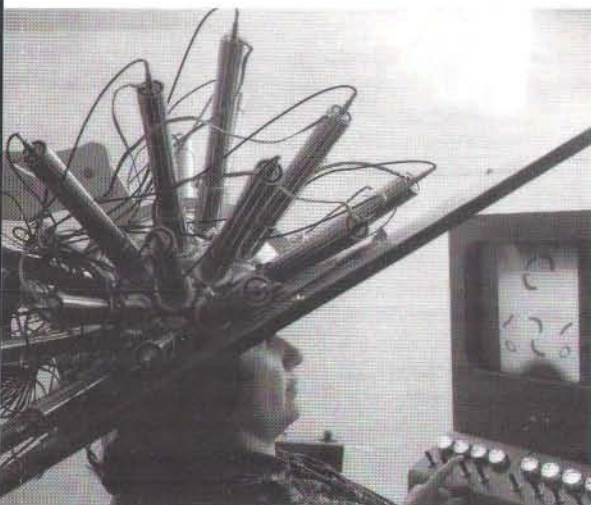
Uit Sperry's split-brainproeven kwamen aanwijzingen dat de rechter-hersenhelft tenminste enige rudimentaire taalvaardigheid bezit, omdat in zijn testen niet alleen de linker- maar ook de rechterhelft op gesproken bevelen reageerde. Met name schijnt de rechterhelft te zorgen voor de zogenaamde *prosodie*, dat zijn de variaties in intonatie die vaak onontbeerlijk zijn om verschillen in betekenis of emotionele kleur aan te geven.

De clou ontgaat ze

Ook lezen lijkt een ongecompliceerde taalfunctie die van nature in de linker-hersenhelft thuishoort. Hoewel beschadiging van de linkerhelft inderdaad tot ernstige leesproblemen kan leiden, tast beschadiging van de rechterhelft het proces soms op subtielere wijze aan. De rechter-hersenhelft verleent aan de interpretatie van leesmateriaal door de linkerhelft meer 'diepte'. Patiënten met rechtszijdig hersenletsel hebben problemen met het begrijpen van woordspelingen, dubbelzinnige opmerkingen, spreekwoorden, beeldspraak en dergelijke. Soms ontgaat ze de clou van een verhaal, het verband tussen de verschillende figuren of kunnen ze de draad niet volgen.

In wezen zijn deze patiënten niet in staat om, door de details van een verhaal ondergeschikt te maken, het grote geheel te overzien. Dit onvermogen bleek uitstekend te illustreren door te vergelijken hoe goed mensen met eenzijdig letsel en gezonde personen een verhaal konden begrijpen. Iedere proefpersoon kreeg de opdracht verhalen te lezen waarin onzinnige passages voorkwamen, zoals een boer die zijn luie knecht slapend in een hooiberg betrapte en de





6

was het kleinst als het voorwerp een eenvoudige geometrische bouw had en steeg naarmate het voorwerp minder regelmatig werd. Het lijkt alsof de rechter-hersenhelft bedreven is in het herkennen van de algemene vorm, de *gestalt*, van een voorwerp. De linkerhelft daarentegen lijkt ingesteld op het herkennen van voorwerpen die te ontleden zijn in eenvoudige onderdelen die gemakkelijk geteld of benoemd kunnen worden, zoals hoeken, randen, gleuven.

Zo hadden Sperry en zijn medewerkers de rechter-hersenhelft uit de vergetelheid gehaald. Later onderzoek, deels van mijzelf, heeft aangetoond dat de rechter-hersenhelft niet alleen beter is in het verwerken van ruimtelijke indrukken maar ook een speciale rol speelt bij emoties: ze is verantwoordelijk voor het interpreteren van de emotionele lading van gebaren, gezichtsuitdrukkingen en waargenomen gebeurtenissen. Mensen met een bepaalde beschadiging van de rechter-hersenhelft hebben vaak moeite met het onderscheiden van een lach en een schreeuw van pijn.

Met het enthousiasme van het grote publiek in de jaren zeventig werd de rechter-hersenhelft in ere hersteld. Toen wetenschappelijk was vastgesteld dat de rechterhelft meer bedreven is in het uitvoeren van ruimtelijke taken, zoals tekenen en het in gedachten voorstellen van ingewikkelde vormen, was de interpretatie van de leek dat hier dan ook onze creativiteit zou zeten. Terwijl veertig jaar daarvoor de linkerher-

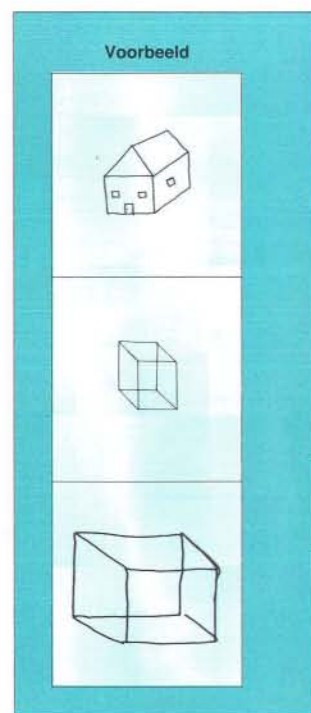
senhelft beschouwd werd als de schatkamer van ons specifiek menselijk erfgoed, werd de rechter-hersenhelft nu het altaar waarvoor aanbidders van fantasie en intuïtie zich in het stof wierpen. In het onderwijs werd gezocht naar nieuwe technieken gericht op de rechterhersen van de studenten in plaats van op hun verbale, analytische linkerhersen. In de boekwinkel verschenen op de psychologieplank steeds meer titels zoals *Sex vanuit het rechterbrein* en *Bevrijd uw rechter-hersenhelft*. De linker-hersenhelft was nu afgezaakt tot de kleurloze, pedante tegenhanger van de rechterhelft.

Hechte samenwerking

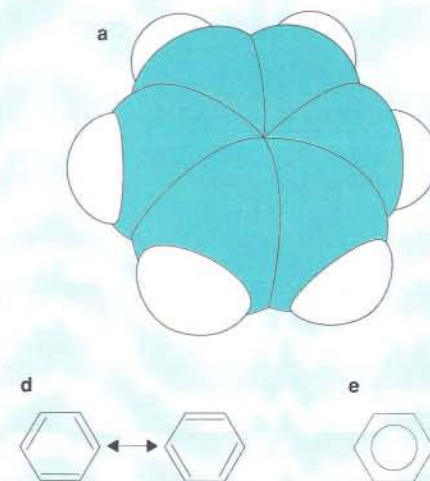
Ondanks de simplificaties en overdreven lofzangen in de lekenpers, kwamen uit hetzelfde onderzoek waarmee de speciale vaardigheden van de rechterhelft waren ontdekt, tegelijkertijd aanwijzingen dat alles niet zo eenvoudig ligt als op het eerste gezicht lijkt. Het werk met chimerische beelden had bijvoorbeeld aangetoond dat hoewel de rechterhelft beter is in het

6. Met dit apparaat kan men de stofwisseling van het bloed in de hersenen meten en zo de activiteit van bepaalde delen van het brein registreren. Dat levert informatie over de heselementen die bij de uitvoering van een bepaalde taak zijn betrokken.

7. De rechter-hersenhelft is beter in 'visuele constructie'-taken dan de linker. Hoewel rechtshandig kon een split-brainpatiënt de voorbeelden slechts met zijn linkerhand natekenen.



7



In structuurformules worden de bindingen weergegeven met streepjes, waarbij elk streepje twee elektronen voorstelt. Deze wijze van weergeven brengt ons soms in moeilijkheden. In benzeen worden de bindingen tussen de koolstofatomen gevormd door 18 elektronen ofwel negen bindingsparen. De afwisseling tussen enkele en dubbele streepjes in de structuurformule suggereert dat de C-C-bindingen afwisselend door twee en vier elektronen worden gevormd. Alle bindingen tussen koolstofatomen in benzeen zijn echter gelijkwaardig. Dat komt doordat van de totaal negen bindingsparen er drie niet specifiek aan de vorming van één enkele binding deelnemen, maar gelijktijdig bijdragen aan de binding tussen alle zes koolstofatomen. Men zegt wel dat deze zes elektronen *gedelokaliseerd* zijn; zij komen verspreid voor bij alle zes koolstofatomen.

Onzekere posities

De bijzonder kleine afmetingen van een molecuul zouden wel eens kunnen leiden tot eigenschappen die we niet direct door extrapolatie kunnen afleiden vanuit de voor ons waarneembare 'macrokosmos'. Diverse meetmethoden geven ons nauwkeurige informatie over de afmetingen van molekulen en zelfs over de bindingsafstanden binnen een molecuul, die worden gemeten als kern-kern-afstanden. Zo we-

ten we dat in benzeen alle koolstof-koolstof-bindingen 0,139 nm lang zijn en alle koolstof-waterstof-bindingen een lengte hebben van 0,110 nm. Dit impliceert dat de grootste afmeting van het gehele benzeenmolecuul circa 0,5 nm is.

Waarom kunnen we nu niet meteen de positie van elk der elektronen opmeten als we de relatieve posities van de kernen zo goed kunnen bepalen? De onmogelijkheid om dit te doen is een demonstratie van het verschil tussen de macrokosmos en de moleculaire microkosmos, of anders gezegd tussen de klassieke mechanica en de quantummechanica. Op moleculaire schaal treden namelijk een aantal verschijnselen op, die we bij grotere systemen niet (kunnen) opmerken. Een belangrijk fenomeen is hier de zogenaamde *plaatsonzekerheid van elektronen*.

Een nuttige wijze om de plaatsonzekerheid van elektronen te beschrijven, is te stellen dat een bewegend lichaam naast een 'deeltjeskarakter' ook een 'golfkarakter' heeft. De Broglie leidde af dat een deeltje met een bepaalde massa en snelheid het karakter heeft van een golf met dezelfde voortplantingssnelheid en een golflengte die omgekeerd evenredig is met zowel de massa als de snelheid. De De-Broglie golflengte (λ_B) geeft ons een indruk van de plaatsonzekerheid van het betreffende deeltje. Het kwadraat van de amplitude van de golf op een bepaald punt in de ruimte, geeft de kans om het deeltje daar aan te treffen. Voor een deeltje met een zeer kleine massa — zoals een elektron — kan λ_B en daarmee de plaatsonzekerheid, gemakkelijk oplopen tot een waarde die vergelijkbaar is met de totale afmetingen van een molecuul. Het is dan onmogelijk om exact aan te geven waar het elektron zich binnen het molecuul bevindt; we kunnen alleen maar een uitspraak doen over de waarschijnlijkheid om het aan te treffen op een bepaalde plaats in het molecuul. De contouren van ruimtelijke modellen stellen dan ook niet meer voor dan de grenzen van een gebied waarbinnen de kans zeer groot is (>99%) om de elektronen aan te treffen.

De golfbeschrijving leert ons niet alleen iets over de plaatsonzekerheid, maar maakt het ook mogelijk een andere belangrijke eigenschap van het elektronengedrag binnen een molecuul te begrijpen: de *quantisering* van elektronen-energie. Dit houdt in dat deze energie niet elke willekeurige waarde kan aannemen, maar

dat hiervoor slechts een aantal scherp bepaalde (gequantiseerde) waarden zijn toegestaan.

De kinetische energie van een elektron hangt — evenals λ_B — af van de massa en de snelheid ($E = \frac{1}{2}mv^2$). Daaruit volgt dat de golflengte van een elektron verband houdt met de kinetische energie van het elektron. Als we ervan uitgaan dat het elektron in elk geval binnen het molecuul moet blijven, dan moet deze De-Broglie-golflengte 'passen' op de moleculaire afmetingen. De amplitude van deze golflengte moet daarom op de grens van het molecuul naar nul gaan. Dit heeft tot gevolg dat het elektron slechts over een beperkt aantal golflengten kan beschikken, namelijk die golflengten waarbij de afmeting van het molecuul gelijk is aan een geheel aantal maal de halve golflengte.

Als er slechts een beperkt aantal golflengten voor het elektron mogelijk is, betekent dat ook dat er een beperkt aantal energietoestanden is. In afbeelding 2 zijn er drie van die 'energieniveaus' geschetst, waarbij twee elektronen het laagste niveau bezetten. Normaliter bevat een molecuul meer dan twee elektronen, die dan paarsgewijze de diverse energieniveaus bezetten.

De quantisering van de elektronenenergie in moleculen is van buitengewoon groot belang voor ons begrip van een veelheid van moleculaire eigenschappen, waaronder de absorptie van licht. Een klassiek wetenschappelijk probleem is de vraag of licht nu een golfverschijnsel of een deeltjesstroom is. Ook hier is echter — net als bij elektronen — sprake van een dualistisch karakter en geldt dat we licht kunnen opvatten als een stroom deeltjes (fotonen) met rustmassa nul en met een energieinhoud die samenhangt met de golflengte ($E = hc/\lambda$). Een lichtbundel bestaat dus eigenlijk uit een stroom massaloze energiepakketjes, elk met een aanzienlijke energie-inhoud die omgekeerd evenredig is met de golflengte van het betreffende licht.

Kleuren en energieën

De energie per foton voor ultraviolet en/of zichtbaar licht correspondeert vaak met de energieverschillen tussen energieniveaus van elektronen in moleculen. Daarmee kan een molecuul een foton van 'passende' energie absorberen. Dankzij de daarbij opgenomen energie kan een elektron promoveren van een lager

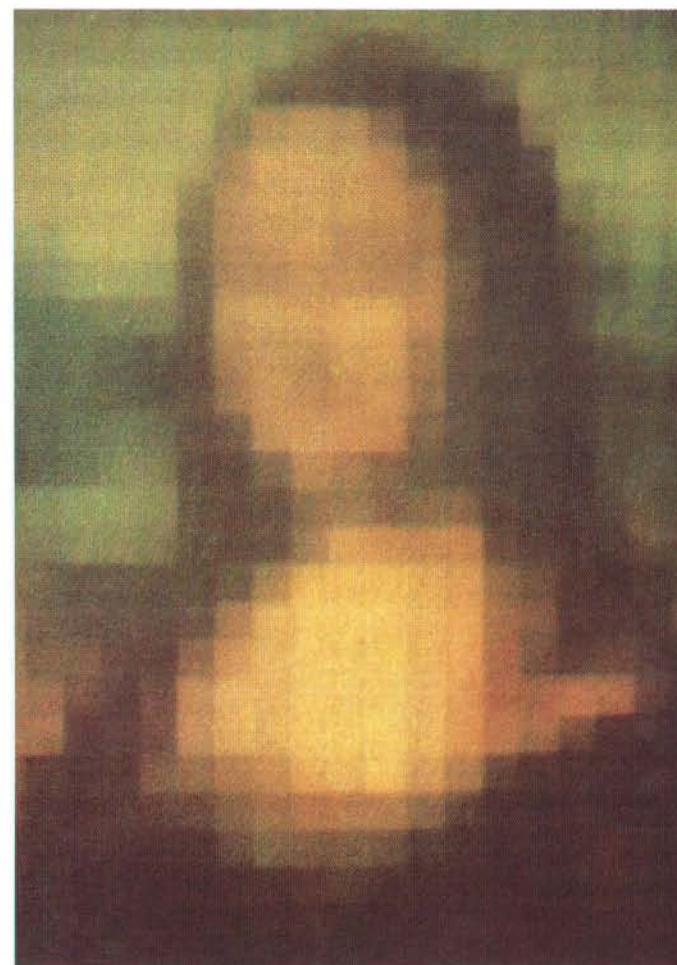


3

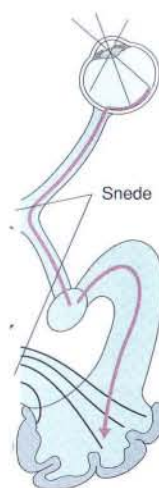
TABEL Licht en energie

Omschrijving	Formule
Golflengte van een deeltje	$\lambda_B = h m^{-1} v^{-1}$
Kinetische energie van een deeltje	$E = 0,5 m v^2$
Energie van een foton	$E = h c \lambda^{-1} = h \nu$
Energie van een niveau	$E = 0,5 h^2 m^{-1} \lambda_B^{-2}$

c = Lichtsnelheid ($3,0 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$)
 h = Constante van Planck ($6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$)
 λ_B = De Broglie-golflengte
 ν = Frequentie E = Energie m = Massa
 λ = Golflengte van het licht v = Snelheid



5



3 en 4. Normaal (3) komt informatie uit het rechterdeel van iemands blikveld in zijn linkse visuele cortex terecht. Door een proefpersoon naar een stip middenin zijn blikveld te laten kijken, kan men er voor zorgen dat een korte flits van een beeld links of rechts van de stip, links of rechts terecht komt. Door het optisch chiasma en het corpus callosum door te snijden (4) bereikt men dat de signalen geheel gescheiden worden verwerkt.

5. Om een gezicht te herkennen heeft de linkerhelft een gedetailleerd beeld nodig terwijl de rechter genoeg heeft aan het patroon als geheel. Mensen met een beschadigde rechter-hersenhelft kunnen daarom grote moeite hebben met het herkennen van dit beeld.

Sterker nog, als beide hersenhelften zich voor dezelfde ruimtelijke opdracht geplaatst zien, dan is het de rechterhelft die de reactie van de proefpersoon bepaalt. Om de hersenhelften bij een ruimtelijke opdracht met elkaar om de leiding te laten wedijveren, ontwikkelden de onderzoeksgroep van Sperry *chimerische prikkels*. Hierbij werden twee patronen of beelden doormidden geknipt en de niet bij elkaar passende helften aan elkaar geplakt. Deze chimerische prikkels werden vervolgens zo op het scherm van de tachistoscoop geprojecteerd dat de helften op verschillende kanten van het gezichtsveld vielen.

Bij een test was elke chimerische prikkel samengesteld uit twee gezichtshelften van mensen die de patiënt kende, en moest de patiënt zeggen wie hij zag, of dat gezicht op een bord met foto's aanwijzen. De overgrote meerderheid wees naar een complete versie van het halve gezicht dat door de rechter-hersenhelft was waargenomen. Moesten ze echter de naam noemen die bij het gezicht hoorde, dan bleek deze te passen bij het halve gezicht dat ze met hun linker-hersenhelft hadden gezien, en maakten ze bovendien meer fouten.

Ander onderzoek deed vermoeden dat de strategie die de rechter-hersenhelft voor dergelijke ruimtelijke opdrachten gebruikt, niet eenvoudig een verbeterde versie is van die van de linkerhelft, maar daar fundamenteel van verschilt. Sperry keek hoe goed de proefpersonen in staat waren een afgebeeld voorwerp louter op de tast uit een hele reeks onzichtbare mogelijkheden uit te zoeken. Steeds gaf de linkerhand (rechter-hersenhelft) hierbij betere prestaties te zien dan de rechter, maar dit verschil

scherm gericht houden. Onderwijl flitsten links of rechts van de stip beelden op het scherm. De flitsen duurden zo kort, dat de proefpersoon er onmogelijk z'n blik op kon richten. Zo werd ervoor gezorgd dat ieder beeld slechts één kant van de netvlies trof en dus naar slechts één hersenhelft werd overgebracht.

De afgescheiden rechter-hersenhelft bleek allesbehalve dom. Zit een split-brainpatiënt bijvoorbeeld voor een scherm waarop het beeld van een lepel rechts van de heldere stip wordt geflitst, dan zal hij desgevraagd antwoorden dat hij "een lepel" ziet. Dit is te verwachten omdat de rechterkant van het gezichtsveld op de linkerkanten van de netvlies valt en naar de linker-hersenhelft wordt geleid, waar het spraakvermogen zetelt. Als het beeld van een lepel links van de stip verschijnt, kan de proefpersoon niet zeggen wat hij ziet, maar als hij mag reageren door op de tast uit een verzameling voorwerpen de lepel te kiezen, dan lukt dat wel.

Split-brainpatiënten, of liever gezegd hun rechter-hersenhelften, bleken nog zwaardere opdrachten aan te kunnen, waarbij ze niet het afgebeelde voorwerp zelf (bijvoorbeeld een sigaret) moesten uitzoeken maar iets wat daarmee verband houdt (een asbak). Bij dit soort testen bleek de rechter-hersenhelft net zo goed te kunnen redeneren en herinneren als de linker, maar dit niet in woorden te kunnen uiten.

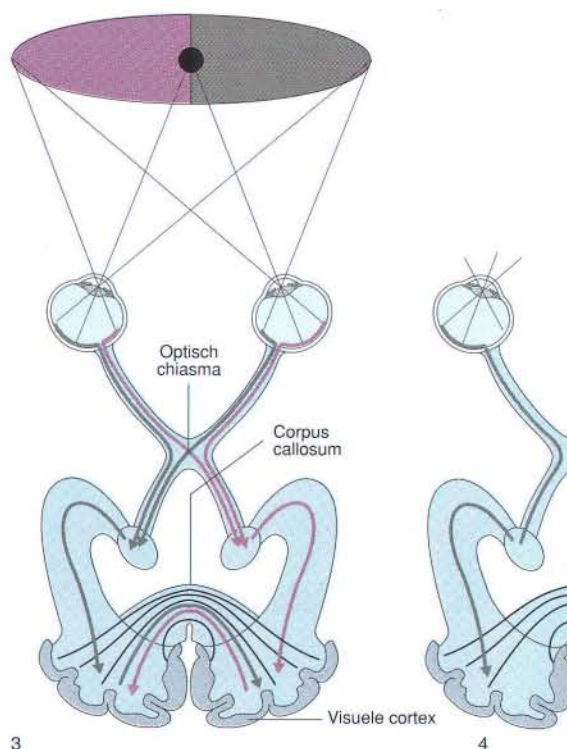
Ondertussen produceerde de spraakzame linkerhelft die niet wist wat de rechterhelft te zien kreeg, vaak wat Sperry en zijn medewerkers 'verzinsels' noemden. Als het beeld van een lepel in het linker-gezichtsveld verscheen en de proefpersoon gevraagd werd te vertellen wat hij zag, luidde het vol overtuiging gegeven antwoord bijvoorbeeld "een potlood". Vaak lag het verzinsel, net als in dit voorbeeld, redelijk voor de hand. Misschien wist de linker-hersenhelft dat het voorwerp klein genoeg moest zijn om met één hand te kunnen oprapen; misschien was een beetje informatie over het voorwerp, bijvoorbeeld dat het lang en dun was, door nog intacte verbindingen diep in de hersenen van de rechts naar links gelekt.

Twee gezichtshelften

De rechter-hersenhelft bleek meer dan een zwijgende linkerhelft. Lang geleden hadden Hughlings Jackson en enkele andere onderzoekers het vermoeden uitgesproken dat de rech-

ter-hersenhelft misschien een grote rol speelt bij het herkennen van gezichten en bij andere problemen waarbij de interpretatie van een ruimtelijk patroon of beeld nodig is. In de tijd dat de linker-hersenhelft volop in de belangstelling stond was deze theorie op de achtergrond geraakt, maar nu werd ze door Sperry en zijn medewerkers bevestigd en uitgebreid: zij vonden dat de rechter-hersenhelft goed met ruimtelijke verhoudingen kan omgaan en veel beter dan de linkerhelft in staat is een verzameling onderdelen tot één visueel geheel te integreren. Bovendien kan de rechterhelft beelden in gedachten ruimtelijk manipuleren.

Een leerling van Sperry liet split-brainproefpersonen een ingewikkeld, driedimensionaal voorwerp met de linker- of rechterhand betasten, waarbij ze moesten overwegen of het kon worden samengesteld uit een serie losse onderdelen op het scherm. De linkerhand, dus de rechter-hersenhelft, bleek hier veel beter in dan de rechterhand. In een ander onderzoek bleek de linkerhand ook veel beter dan de rechter bij het tekenen van een kubus, zelfs al waren de meeste proefpersonen rechtshandig.



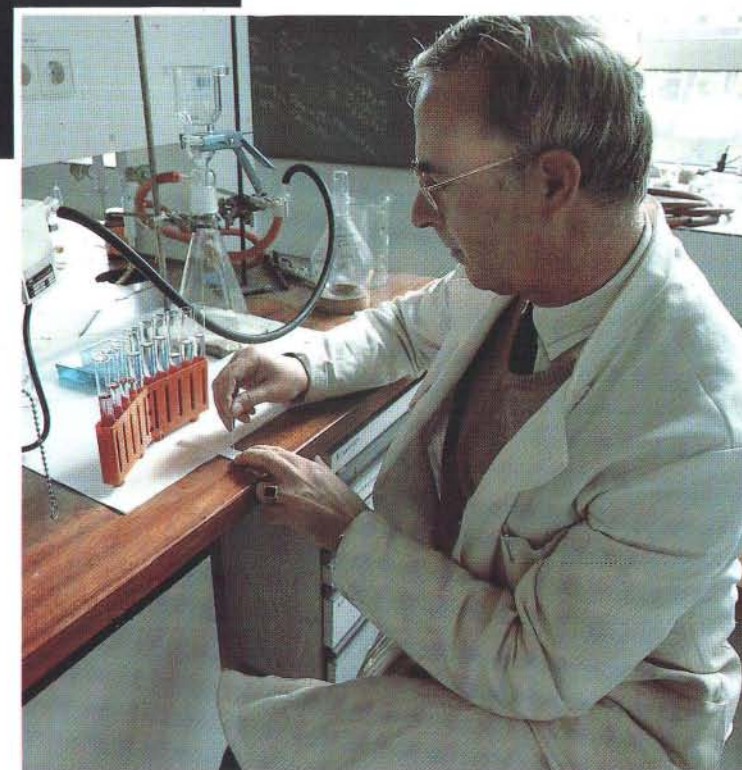
3

4



3. In de natuur zorgen pigmenten voor een bonte verscheidenheid aan kleuren. De kleuren van verbindingen als caroteen (oranje), lycopenen (rood) en chlorofyl (groen), worden bepaald door de afmetingen binnen deze molekulen waarover gedelokaliseerde elektronen zich kunnen verplaatsen.

4. Een onderzoeker hanteert in het laboratorium reageerbuizen met monsters. Na de synthese van de gewenste verbindingen onderwerpt men deze aan diverse experimenten waarin men de diodewerking probeert te bepalen.



4

naar een hoger energieniveau. De hiervoor benodigde energie neemt af, als de afmetingen toenemen van de *potentiaalput* waarin het elektron binnen het molecuul zit opgesloten. Men zou dus verwachten dat grotere molekulen licht van langere golflengte (dus fotonen met geringere energie) kunnen absorberen dan kleine molekulen. Deze voorspelling wordt verrassend goed door experimenten bevestigd. Relatief kleine molekulen zoals benzeen en naftaleen absorberen alleen ultraviolet licht — deze stoffen zijn naar menselijke maatstaven derhalve kleurloos — maar grotere molekulen zoals tetraceen, caroteen en de groene plantenkleurstof chlorofyl, absorberen licht van aanmerkelijk langere golflengte: in deze molekulen is minder energie nodig om een elektron naar een hoger niveau te promoveren en zij zijn daardoor voor ons gekleurd (afb. 3).

Deze relatie tussen de afmeting van een molecuul en de golflengte van het licht dat erdoor wordt geabsorbeerd, geldt alleen als de elektronen die door de absorptie van dat licht in een

hoger energieniveau komen zich ook werkelijk kunnen bewegen over het volledige molekuul. De potentiaalput waarin deze elektronen gevangen zitten, moet dus net zo groot zijn als het molekuul zelf. Voor sommige plantenkleurstoffen is dit bij benadering het geval, omdat hierin elektronen voorkomen die over het gehele molekuul gedelokaliseerd zijn. Een betrekkelijk geringe verandering in de structuur kan deze delokalisatie echter drastisch verstoren.

Zo'n verstoring blijkt uit de omzetting van tetraceen in hexahydrotetraceen. In laatstgenoemde verbinding hebben de middelste ringen van een tetraceenmolekuul hun benzeenachtige karakter verloren door het toevoegen van waterstofatomen (afb. 5a en 5b). Tetraceen bevat elektronen die over alle ringen gedelokaliseerd zijn en zich dus in een potentiaalput met grote afmetingen bevinden. De beschikbare energieniveaus liggen dicht op elkaar en er is weinig energie nodig — een foton van zichtbaar licht — om een elektron uit het hoogste bezette niveau naar het eerste onbezette niveau te promoveren; de stof is oranje van kleur. In het even grote hexahydrotetraceen bevatten alleen de 'linkse' en 'rechtse' ringen gedelokaliseerde elektronen, terwijl de tussenliggende, verzadigde ringen een barrière vormen voor die gedelokaliseerde elektronen. Het molekuul bevat dus twee potentiaalputten met ongeveer dezelfde afmetingen als benzeen. Deze verbinding absorbeert daardoor — net als benzeen — alleen ultraviolet licht; door een schijnbaar klein verschil is de stof niet oranje maar kleurloos.

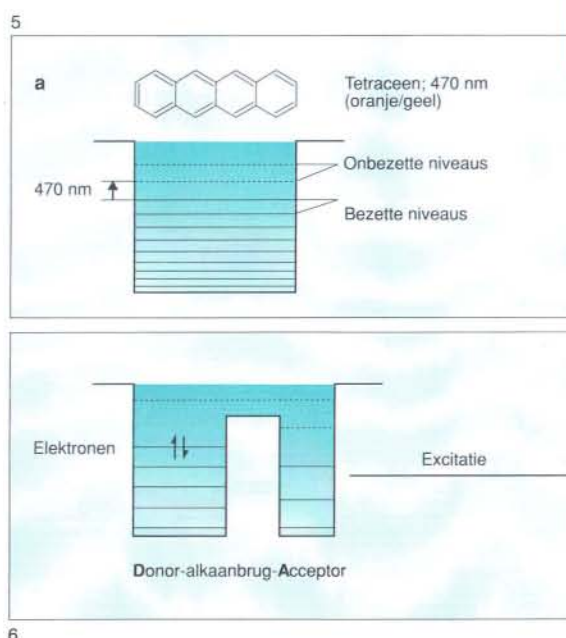
Moleculaire elektronica

De kleur van een stof hangt samen met de grootte van de potentiaalput. Een grotere potentiaalput vereist een lage hoeveelheid energie (grotere golflengte van het foton) om een elektron op een hoger energieniveau te brengen. Een kleinere potentiaalput behoeft daarentegen een grotere hoeveelheid energie (kleinere golflengte van een foton) om een elektron op een hoger energieniveau te krijgen.

Een diode laat in één richting de stroom veel gemakkelijker door dan in de andere. Als we een moleculaire diode willen hebben, dan moeten we zoeken naar een molekuul waarbinnen een elektron bij voorkeur in een bepaalde

richting beweegt. Daarmee komen we op het gebied van de 'moleculaire elektronica'. Eén van de voornaamste doeleinden van dit vakgebied is het realiseren van een molekuul dat zich gedraagt als een diode of een ander actief elektronisch onderdeel en dat als een submicroscopisch element in een groter circuit kan worden ingebouwd.

Noch van molekulen waarin de elektronen zich gedragen als gevangene in één enkele potentiaalput (zoals tetraceen), noch van molekulen waarin de elektronen over meerdere maar gelijkvormige potentiaalputten verdeeld zijn, mag de gewenste diode-werking worden verwacht. Door een kleine variatie van het laatstgenoemde type molekuul kan echter toch een systeem met diode-eigenschappen worden verkregen. Daartoe zorgen we namelijk dat de ene potentiaalput relatief groot is en veel elektronen bevat, terwijl de andere klein is en minder elektronen bevat. Zo verkrijgen we een systeem waarbij het minder energie kost om elektronen over de barrière van de grote potentiaalput (die we in het vervolg *donor* zullen noemen) naar de kleine put (de *acceptor*) te laten vloeien dan omgekeerd (afb. 5c). Zo'n donor-acceptor-combinatie met als scheiding een verzadigde 'alkaanbrug', heeft in principe de gewenste diode-eigenschappen.

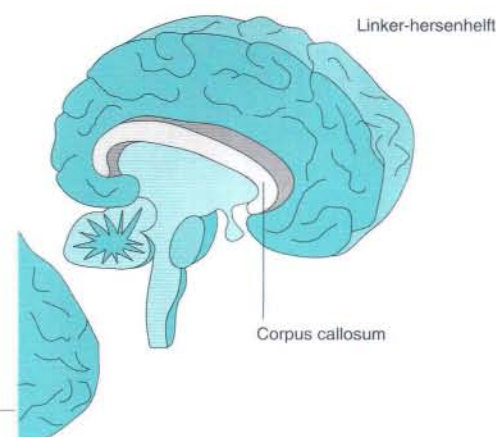


6

afkomstig uit één oog slechts één hersenhelft kon bereiken.

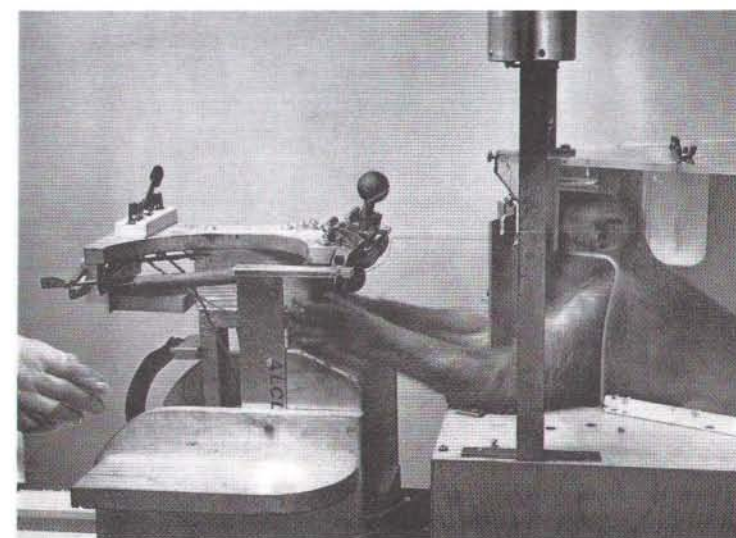
Toen ieder oog uitsluitend met één hersenhelft verbonden was, werd een aantal plaatjes-testen gebruikt om de scheiding aan te tonen. Eén oog van de kat werd bedekt en het dier werd geleerd een hefboom over te halen als er een beeld voor het onbedekte oog flitste.

Normaliter past een kat die heeft geleerd te reageren op een beeld voor het ene oog zich snel aan, en reageert ook als in plaats daarvan het andere oog het plaatje te zien krijgt. Maar de split-brainkatten konden dat niet: het was alsof de hersenhelft verbonden met het andere oog, niets afwist van de taak die de eerste helft



1. De linker- en rechter-hersenhelft zijn met elkaar verbonden door de hersenbalk, ofwel het corpus callosum. Het is een brede zenuwstreng waardoor tweehonderd miljoen zenuwvezels de communicatie tussen links en rechts verzorgen.

2. Sperry en medewerkers voerden veel split-brainproeven uit bij katten en apen. Deze aap met gescheiden hersenhelften is betrokken bij een experiment waarin de oog-handcoördinatie van het dier getest wordt.



2

geleerd had. Een kat die het kunstje met het rechteroog (de rechter-hersenhelft) had geleerd, moest bij het linkeroog (de linker-hersenhelft) weer helemaal opnieuw beginnen.

Verzinsels

Ondertussen hadden twee Californische neurochirurgen de draad van Van Wagenen's onderzoek weer opgepakt. Bij een aantal ernstige epilepsiepatiënten sneden ze alle verbindingen tussen de hersenhelften door. Later onderzocht Sperry veel van deze patiënten. Sperry en zijn medewerkers kwamen tot de conclusie dat de scheiding van de hersenhelften ook bij mensen het normaal functioneren van de hersenen belemmert. Zij spraken van het *split-brainsyndroom*. Vervolgens wierp de onderzoeksgroep zich op de volgende vraag: wat zijn de verschillen en overeenkomsten tussen de functies van de gescheiden hersenhelften?

Sperry's groep onderzocht de reacties van elke hersenhelft op visuele beelden. Om te zorgen dat elk beeld slechts één hersenhelft kon bereiken, ondanks het feit dat elk oog met beide helften in verbinding staat, gebruikten ze een tachistoscoop (van het Griekse woord *tachis*, snel), een apparaat waarmee korte flitsen van beelden op een scherm worden geprojecteerd. Iedere split-brainpatiënt moest de blik op een heldere stip in het midden van het

Laten we haar F.R. noemen. Op tweejarige leeftijd kreeg ze haar eerste aanval van epilepsie, waarschijnlijk veroorzaakt door een bij haar geboorte beschadigd stukje hersenweefsel, dat een 'onweer' in haar hersens ontketende. Nu ze zesentwintig is heeft ze er vaak een paar keer per dag last van. Ze raakt buiten bewustzijn en valt op de grond, haar lichaam schokt heftig en verslapt dan.

Medicijnen helpen weinig. Door haar ziekte kan F.R., overigens een vrolijke, intelligente vrouw, alleen wat helpen met de boekhouding en eenvoudige karweitjes op de boerderij van haar familie. Als laatste redmiddel verwijst haar arts haar naar een neurochirurg die vaker zulke patiënten heeft behandeld.

Deze neurochirurg, William P. Van Wagonen uit Rochester in de staat New York, stelt voor de zenuwstreng die de diepe kloof tussen de twee hersenhelften overbrugt, het *corpus callosum*, door te snijden. De ingreep is bedoeld om een soort overlangse brandlaan te scheppen. Daardoor kan een elektrische storing in de ene helft niet meer doorstromen naar de andere kant en daar ook een toeval veroorzaken. F.R. is ten einde raad en stemt in met de operatie, die in het vroege voorjaar van 1929 wordt uitgevoerd.

Alles gaat goed, en door de ingreep neemt het aantal toevallen inderdaad iets af. Het klieven van het corpus had de belangrijkste verbinding tussen de twee hersenhelften vernietigd, en deze in twee grotendeels onafhankelijke eenheden gescheiden.

In de tijd dat F.R. werd geopereerd dacht men nog dat de rechter-hersenhelft weinig aan de hogere hersenfuncties bijdroeg, al was bekend dat de rechterhelft de bewegingen en het gevoel van de linker-lichaamshelft reguleert.

Omstreeks 1860 had de Franse neuroloog Paul Broca ontdekt dat een stukje hersenschors in de linker-hersenhelft voor de spraak verantwoordelijk is. Later onderzoek wees uit dat in feite alles wat met taal te maken heeft in de linker-hersenhelft zetelt, dus spreken, lezen en, bij rechtshandige en de meeste linkshandige mensen, ook schrijven. Taal is specifiek menselijk en zo steeg de linker-hersenhelft in aanzien. Neurologen raakten ervan overtuigd dat de meeste hogere functies, waaronder het bewustzijn en de motivatie hier gelokaliseerd waren.

Enkele onderzoekers, met name de Engelse neuroloog John Hughlings Jackson, hadden er

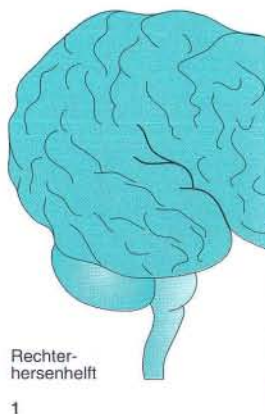
aan het eind van de negentiende eeuw op gewezen dat ook de rechter-hersenhelft bepaalde specialisaties kende. Zo hadden patiënten bij wie alleen de rechter-hersenhelft beschadigd was, vaak moeite met het herkennen van ingewikkelde patronen. Toch waren bij het begin van deze eeuw de meeste neurologen ervan overtuigd dat de rechter-hersenhelft niet meer dan een ondersteunende rol vervulde. Velen geloofden dat het corpus callosum zonder ernstige gevolgen kon worden doorgesneden.

Plaatjetest

Al snel realiseerden neurologen zich dat mensen met een doorgesneden corpus callosum, zogenaamde *split-brainpatiënten*, uitstekende proefpersonen waren voor het bestuderen van de functionele verschillen tussen de hersenhelften. Voor dat kon, moest men echter eerst te weten zien te komen hoe het bewustzijn in de gescheiden helften precies is georganiseerd.

In de jaren vijftig boekte Roger W. Sperry aan het California Institute of Technology, samen met zijn collega's grote vooruitgang op dit terrein bij het werk aan split-brainpatiënten. Voor dit onderzoek zou Sperry in 1981 een Nobelprijs ontvangen.

Sperry en medewerkers begonnen met het bestuderen van katten. Om de twee hersenhelften van elkaar te isoleren, sneden ze bij sommige dieren niet alleen het corpus callosum door maar schakelden ze ook de verbindingen van het gezichtsvermogen gedeeltelijk uit. Net als bij de mens stuurt bij katten ieder oog informatie naar beide hersenhelften. Informatie afkomstig van het rechteroog gaat naar de *visuele cortex* — het stuk van de hersenschors waar het gezichtsvermogen zetelt — in de rechter-hersenhelft, en informatie van het linkeroog naar de visuele cortex in de linker-hersenhelft. Door het doorsnijden van het *chiasma opticum*, waar de helft van de zenuwstrengen van ieder oog elkaar kruist en naar de tegenoverliggende hersenhelft oversteekt, zorgden de onderzoekers ervoor dat informatie



Fotogeïnduceerde ladingsscheiding

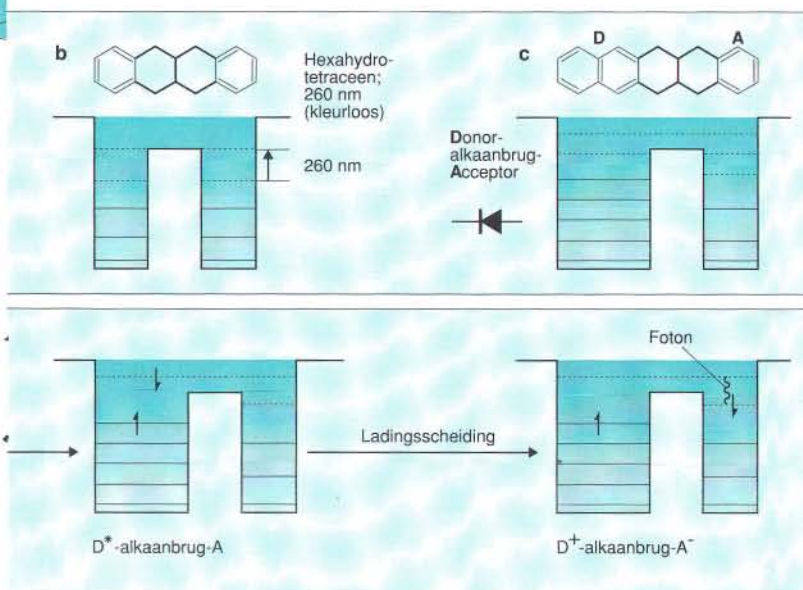
We weten nu waaraan een molecuul moet voldoen om diodewerking te hebben. Als we een molecuul volgens dit recept hebben ontworpen, hebben we een experiment nodig waarmee we kunnen toetsen of het molecuul inderdaad diodewerking heeft. Dat zou vereisen dat we aan de donor en de acceptor in dergelijke molekulen op atomaire schaal elektriciteitsdraadjes vastmaken en de stroom door het molecuul gaan onderzoeken. Dit moeilijke experiment kunnen we ons echter besparen door op verstandige wijze gebruik te maken van wat we hebben geleerd omtrent de absorptie van licht door molekulen.

We gaan uit van een verbinding die bestaat uit een donor en een acceptor, gescheiden door een alkaanbrug. Na absorptie van een geschikt foton ($h\nu_D$) door de donor kan een elektron de energiebarrière — gevormd door de alkaanbrug — overwinnen; het elektron kan zich verplaatsen naar de acceptor waar het weer naar een lager energieniveau terugvalt. Zo ontstaat een toestand waarin sprake is van een ladingsscheiding, een groot elektrisch dipoolmoment én een grote energieinhoud (afb. 6). Met laserspectroscopie kunnen we het elektronentransport volgen. Zo kunnen we de diode-eigen-

schappen van dat molecuul onderzoeken zonder dat we er elektrische contacten aan hoeven te bevestigen.

Een belangrijk deel van ons onderzoek richt zich op het maken van molekulen waarin de genoemde ladingsscheiding onder invloed van licht kan optreden. In de loop der jaren hebben we verscheidene van dit type molekulen kunnen maken. Daarbij hebben we getracht door variatie van de donor, de acceptor en de alkaanbrug die deze groepen verbindt, nader inzicht te verwerven in elektronentransport op moleculaire schaal. Tot deze systemen behoort in de eerste plaats een opmerkelijke reeks verbindingen die we in Amsterdam bestuderen in samenwerking met Australische onderzoekers. Bij deze groep van verbindingen varieert de lengte van de alkaanbrug terwijl de donor en de acceptor steeds dezelfde moleculaire structuur hebben (afb. 8).

Toen we rond 1983 met dit onderzoek begonnen, bestond er grote skepsis ten aanzien van de vraag of het wel zou kunnen om met behulp van licht een elektron zoveel energie te geven, dat het inderdaad verhuist van de donor naar de acceptor via de verzadigde alkaanbrug. De meeste onderzoekers vatten toen namelijk alkaanbruggen op als vrijwel volledige isolatoren.



5. De kleur van een verbinding hangt samen met de ruimte binnen het molecuul waarover een elektron zich kan verspreiden. Het aromatische molecuul tetraceen heeft een geeloranje kleur (a). In hexahydro-tetraceen zijn de middelste ringen niet aromatisch (b). Zij vormen een brug die twee potentiaalputten scheidt. Door de putgrootte te variëren, verkrijgt men in principe een moleculaire diode (c).

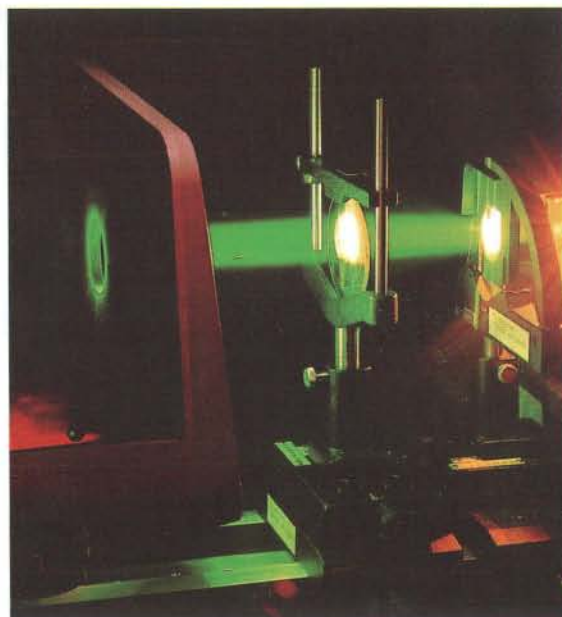
6. In rust bevinden de elektronen van een donorput zich op de laagste energieniveaus. Door toevoer van licht met een bepaalde energie, raakt een van hen geëxciteerd en kan zich op het hogere energieniveau door het gehele molecuul bewegen. Als het onder uitzending van een foton terugvalt in de acceptorput, is de ladingsscheiding gerealiseerd.

Diodewerking of niet

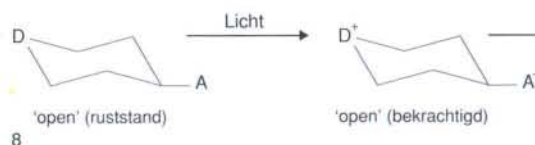
Voor diode-werking is het uiteraard gewenst dat het elektronentransport van donor naar acceptor zo snel mogelijk verloopt. Om de tijd die daarvoor nodig is te kunnen meten, zochten we onze toevlucht tot laserspectroscopie. Daarmee bepaalden we de tijdsconstante (t_i) van het elektronentransport in de diverse verbindingen. Toen bleek dat er geen reden was voor twijfel over de realiseerbaarheid van elektronentransport (afb. 8). De tijden variëren namelijk van enkele picoseconden tot ruim een nanoseconde (miljardste seconde). We moesten dan ook buitengewoon snelle meettechnieken gebruiken om deze tijdsconstanten te kunnen bepalen.

Dankzij samenwerking met specialisten op het gebied van snelle laserspectroscopie uit de vakgroep Fysische chemie van de Universiteit van Amsterdam, is dat in bijna alle gevallen gelukt. Alleen bij de verbinding met de kortste brug (I(4)) bleek de ladingsscheiding zo snel te gaan dat de tijdsconstante onmeetbaar was.

Deze metingen toonden onomstotelijk aan dat in deze 'moleculaire fotodioden' zeer snel elektronentransport in één richting mogelijk was. Toch gaven de laserspectroscopische bepalingen nog geen volledig uitsluitsel over de



7



8

	Donor → Brug → Acceptor	t_i (nanoseconden)	t_u (nanoseconden)
I (4)	 2,5 nm	<< 0,002	1
I (8)		0,019	32
I (12)		1,370	740

9

22



De succesvolle kunstschilder Reynold Brown werd in 1976 getroffen door een beroerte in zijn rechter-hersenhelft. De attack beschadigde zijn visuele en ruimtelijke vermogens. Sindsdien bestaat voor hem de linkerhelft van de hem omringende ruimte niet meer. Brown verloor ook de fijne motoriek van zijn linkerhand en aangezien hij links-handig was moest hij opnieuw, rechts, leren tekenen. Deze tekeningen uit 1986/87 maakten deel uit van de tentoonstelling *Kunst en de hersenen* waarin werk van kunstenaars met een hersenbeschadiging te zien was.

BRUG IN HET BREIN

Mensen met een doorgesneden verbinding tussen de twee hersenhelften, zogenaamde split-brainpatiënten, zijn uitstekende proefpersonen voor het bestuderen van de functionele verschillen tussen de linker- en rechter-hersenhelft. De linkerhelft blijkt vooral in staat tot verbale en

analytische functies, terwijl de rechterhelft ruimtelijke en synthetische vermogens aan de dag legt. Voor hogere functies, en zeker voor prestaties op het allerhoogste niveau, is een samenspel tussen beide onontbeerlijk. Dat wordt bereikt door voortdurende communicatie tussen de hersenhelften.

Wendy Heller
University of Illinois
at Urbana-Campaign, VS

Twee helften Eén gedachte

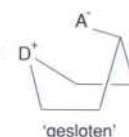
DE



7. In een kleurstoflaser zenden organische molekulen licht met diverse golflengten uit. Een koperlaser pompt energie in de kleurstoffenoplossing en brengt zo elektronen op een hoger energieniveau. Met prisma's selecteert men de gewenste lasergolflengte.

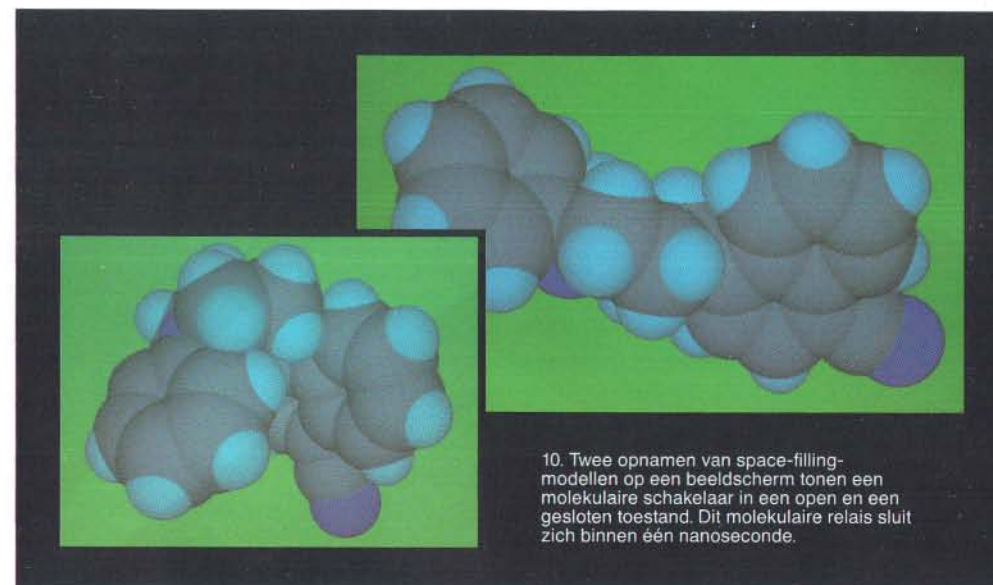
8. Bij ontworpen molekulair dioden heeft men gemeten hoe snel in deze molekulen een elektron van donor naar acceptor gaat (t_d) en hoe lang de zo veroorzaakte ladingscheiding duurt (t_a). De verbindingen onderscheiden zich enkel in de lengte van de alkaanbrug. Bij 1(12) wordt de alkaanbrug gevormd door twaalf ringen. De verhouding tussen t_d en t_a is hier maar liefst een factor 540.

9. Het principe van de moleculaire schakelaar is een alkaanring met een stoelvorm waaraan een donor (D) en een acceptor (A) zijn gekoppeld. Met licht wordt een ladingscheiding veroorzaakt; een elektron verplaatst zich van D naar A. Door de elektrostatische aantrekking tussen D^+ en A^- verandert de stoelvorm van de ring in een bootvorm.



vraag of we hier wel echt van diodewerking in deze molekulen mogen spreken. Daarvoor zouden we immers ook moeten laten zien dat elektronentransport in de omgekeerde richting niet of veel trager verloopt.

Voor elektronentransport in omgekeerde richting moet het systeem vanuit de ladingsgescheiden toestand weer terugkeren naar de uitgangstoestand, zoals die bestond voordat we licht instraalden. Het elektron kan hierbij niet óver de barrière omdat de nodige energie daarvoor ontbreekt. In feite moet het dus dóór de barrière heengaan. Dat laatste proces noemt men ook wel 'tunneling'. Dit proces is mogelijk door de onzekerheid in de positie van een elektron, de zogenaamde plaatsonbepaaldheid. We kunnen immers onmogelijk aangeven waar een elektron zich *precies* bevindt binnen een molekuul, slechts de waarschijnlijkheid waar het elektron in het molekuul is. Met andere woorden: de kans om het elektron in de barrière aan te treffen is wel klein, maar niet helemaal nul. Daardoor kunnen elektronen relatief gemakkelijk tunnelen. De vraag hoe snel deze teruggang via tunneling gebeurt, is identiek aan de vraag hoe lang de ladingsgescheiden toestand duurt nadat die is gevormd door de (snelle) fotogeïnduceerde ladingsscheiding. Teneinde die vraag te kunnen beantwoorden, ontwikkelden



10. Twee opnamen van space-filling-modellen op een beeldscherm tonen een moleculaire schakelaar in een open en een gesloten toestand. Dit moleculaire relais sluit zich binnen één nanoseconde.

onderzoekers aan de universiteit van Delft een zeer elegante techniek, met de klinkende naam 'time resolved microwave conductivity' (TRMC).

Een sterk bipolair deeltje — zoals de gezochte ladingsgescheiden toestand — blijkt veel sterker microgolven te absorberen dan een niet-bipolair deeltje zoals de uitgangstoestand van onze donor-acceptor-verbindingen. In het experiment brengt een korte laserflits eerst een deel van de donor-acceptor-molekelen in de ladingsgescheiden toestand, en vervolgens meet men met microgolfabsorptie hoe lang ze in deze toestand blijven. Vergelijking van de zo bepaalde uitschakeltijd t_u met de inschakeltijd t_i laat zien dat de vorming van de ladingsgescheiden toestand veel sneller (ongeveer duizend maal) verloopt dan de terugval. Dat houdt in dat het elektronentransport in de 'geleidingsrichting' veel sneller gaat dan het elektronentransport in de 'sperrichting': er is hier dus inderdaad sprake van diodewerking. Door het tunneleffect is de 'weerstand' in de sperrichting echter niet erg groot, want elektronentransport in die richting vindt zelfs via de langste alkaanbrug nog steeds plaats in ongeveer één microseconde. Bij toepassing van moleculaire diodes in een computergeheugen zou de ladingsscheiding daarom met een hoge frequentie moeten worden ververst.

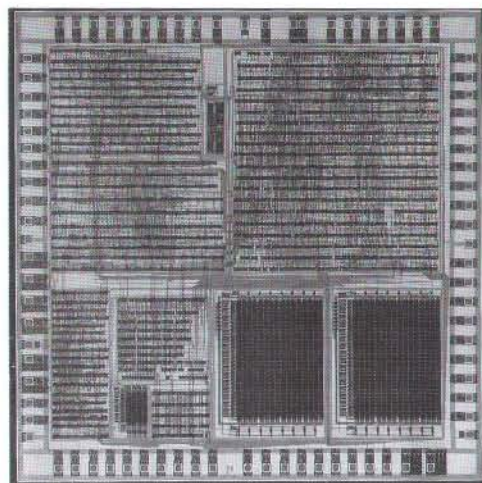
Schakelende molekulen

In de tot nu toe door ons en anderen bestudeerde moleculaire dioden probeert men een schakelend effect te ontleen aan een richtingsafhankelijke geleiding binnen een molekuul. De ruimtelijke opbouw van het molekuul (de conformatie) is voor en na het schakelmoment vrijwel gelijk. Bij toeval zijn we onlangs echter gestuit op een verschijnsel dat het mogelijk lijkt te maken om op moleculaire schaal een elektromechanische schakelaar te imiteren. We ontdekten deze mogelijkheid toen we systemen onderzochten die verwant zijn aan de moleculaire dioden. Nu hadden we echter voor de alkaanbrug een groep met een zekere flexibiliteit gekozen. In zo'n molekuul is de brug een ring die normaliter een open, zogenaamde *stoelconformatie* heeft. Daardoor blijven de donor en de acceptor ver van elkaar verwijderd en maken zij geen direct contact (afb. 9).

Evenals bij de moleculaire dioden kunnen

11. De schakelingen op een siliciumchip worden steeds kleiner. Wellicht kunnen nog kleinere schakelingen worden verkregen met het

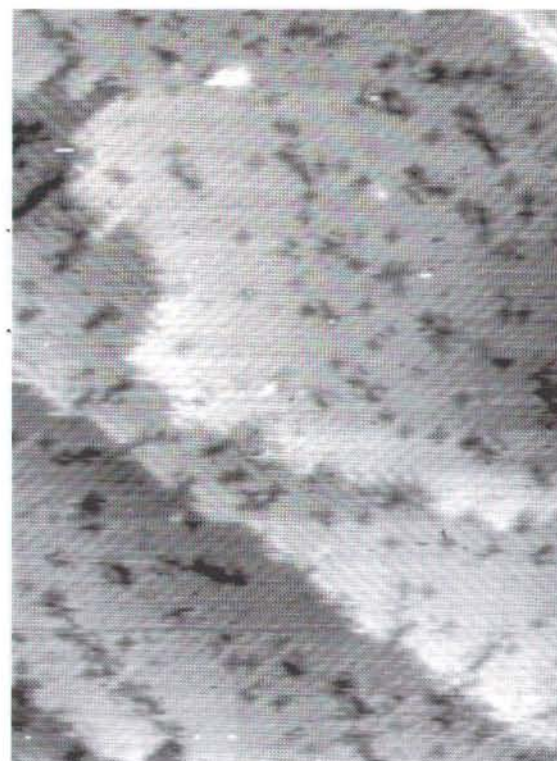
toepassen van kleine hoeveelheden organische molekulen die geleiden en schakelen onder invloed van licht.



11

wij ook hier met behulp van licht zeer snel een elektron van de donor naar de acceptor overdragen. Daarna gebeurt er echter iets opmerkelijks. Ten gevolge van de elektrostatische aantrekking tussen de nu tegengesteld geladen uiteinden blijkt het molekuul via een razendsnelle knikbeweging om te schakelen naar een gesloten conformatie; de brug verandert van de stoel- naar de zogenaamde bootconformatie, waarin de donor en de acceptor wel direct contact maken. Dit mechanisme noemen we *harpoenering* omdat aan het 'overgeschoten' elektron (de harpoen) als het ware een lijn (de elektrostatische aantrekking) vastzit waarmee de uiteinden naar elkaar toe worden getrokken. Space-filling-modellen laten duidelijk zien hoe sterk de vorm van het molekuul tijdens dit harpoeneringsproces verandert (afb. 10).

De zeer hoge snelheid waarmee het moleculaire relais zich sluit (ongeveer één nanoseconde) is te danken aan de zeer geringe afmetingen ervan. We weten nog niet precies hoe snel deze moleculaire schakelaars weer terugveren in hun open positie. Computersimulaties wijzen er op dat dit aanmerkelijk meer tijd kan vergen



De scherpe punt van de scanning-tunneling-microscop (STM) kan men ook gebruiken als een nanometer-fijne graveernaald (afb. 14). Men kan letters graven met een breedte van twintig atomen. Dit is honderdduizend maal zo veel informatie-dichtheid als op een CD-plaatje. Alles wat een mens in zijn leven ooit gelezen heeft en nog zal lezen past, zo geschreven, op 1 mm². Dit is dan wel niet zo praktisch, maar het is wel een leuke gedachte.

Na de beschouwing van schone oppervlakken is het interessant om naar de groei van dunne lagen te kijken. Als men een Si(100)-oppervlak een paar graden scheef afslijpt, ontstaat er een oppervlak met regelmatige mono-atomaire stappen; een terrasstructuur die lijkt op een rijstveld. Zoals uit het atoommodel blijkt zijn die stappen niet allemaal hetzelfde. Op het ene terras liggen de doorgesneden bindingen in dezelfde richting als de drempel en op het volgende terras liggen ze er loodrecht op. Op een STM-plaatje is dit duidelijk te zien: de ene soort drempel wordt rafelig terwijl de andere kaars-

recht is. Echt interessant wordt het als men het silicium bij een goed gekozen temperatuur op het oppervlak laat aangroeien. De groeisnelheid op de terrassen met de rafelige stappen is veel groter dan die op de terrassen met de rechte stappen. Het resultaat is dat na een halve monolaag de helft van de terrassen volgegroeid is en het oppervlak dubbele treden heeft met rechte randen.

Groeiende terrassen

De vraag is of deze techniek een goed uitgangspunt is voor het maken van een toepasbare structuur. Wellicht zullen technici na de tweedimensionale quantumput behoefte hebben aan een eendimensionale quantumdraad. Misschien kan men deze op de kristallerrassen laten groeien. Nu nog een vraagteken, straks misschien een nieuwe techniek.

Zo'n veertig jaar geleden vertelde een scheikundeleraar op de middelbare school dat atomen wel bestonden, maar dat niemand ze ooit zou kunnen zien. Daardoor kregen de atomen iets mystieks en persoonlijks, net zo als kabouter. Hoewel de leraar ongelijk heeft gekregen, is dat kabouterjesbeeld nog steeds van toepassing op atomen. Atomen hebben iets persoonlijks, zijn zichtbaar te maken, hebben vorm en kleur, kunnen worden gestuurd en zijn misschien wel te dresser. Dat is precies de plaats waar wetenschap en techniek elkaar beïnvloeden en van elkaar leren.

Literatuur

- Rooze H. Atomen afgetast - De tunneling microscop. *Natuur & Techniek* 1986; 54: 6, 472-483.
Meijer F. Fotonen voor elektronen - Optische communicatie. *Natuur & Techniek* 1988; 56: 11, 898-913.
Reedijk J. Silicium - Het aardse element. *Natuur & Techniek* 1989; 57: 5, 398-409.

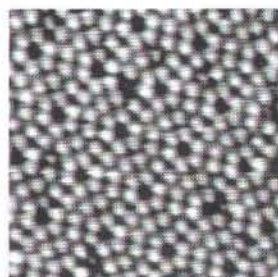
Bronvermelding illustraties

- Kernforschungsanlage Jülich, Duitsland: 38-39, 4, 6, 11.
Philips Research Laboratories, Eindhoven: 1, 5, 8, 9, 10, 12.
A.J. Hoeven, Proefschrift Leiden, mei 1990: 13.
E.J. van Loenen, Philips, Eindhoven: 14.

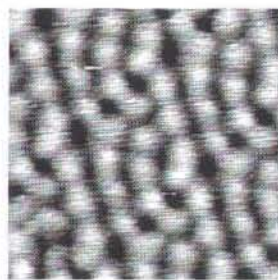
Het wetenschappelijk onderzoek aan atomaire schone oppervlakken heeft daarin een bijdrage gehad, maar het is er niet vanzelf — oorzaak en gevolg — uit voortgekomen. De technologie is een vak apart, dat gebruik maakt van de verzamelde wetenschappelijke kennis. De dialoog tussen een volwassen wetenschap en een volwassen technologie is boeiender dan de aanname dat technologie het natuurlijke kind van de wetenschap is; het wordt dan vanzelf het kind van de rekening.

Scanning-tunneling-microscopie

Het kijken naar schone oppervlakken kreeg in 1984 plotseling een nieuwe impuls door de uitvinding van de *scanning-tunneling-microscopie* door Binnig en Röhrer van het IBM-lab in Zürich. Het idee is eenvoudig. Een punt met een doorsnee van enkele atomen bevindt zich in een houder die in drie richtingen met grote precisie kan bewegen; deze nauwkeurigheid ligt in de orde van atomaire afmetingen. De punt brengt men vervolgens tot op atomaire afstand van het te bestuderen oppervlak. De buitenste elektronen van een vaste stof, zeg maar van een atoom, bevinden zich op enige afstand



12a



12b



13



14

12. STM-opnamen bij verschillende vergroting van het Si(111)-oppervlak tonen grote (7x7)-eenheidscellen die zich na verhitting aan het kristaloppervlak hebben gevormd.

13. Als een Si(100)-oppervlak schuin wordt afgeslepen, verkrijgt men hiervan met de scanning-tunneling-microscopie een beeld dat doet denken aan rijstveld-terrassen.

14. Aangezien het lezen en schrijven van deze tekst beide met de STM moet gebeuren, wat een trage methode is, lijkt een praktische toepassing van nanograferen nog ver weg.

van dat atoom. Deze kans om een elektron aan te treffen neemt exponentieel af met de afstand. Komt de punt dicht genoeg bij het oppervlak, dan overlappen de elektronenwolken van de punt en het oppervlak elkaar en kan het elektron van de één naar de ander oversteken; tunnelen. Deze tunnelwaarschijnlijkheid, dus het meetbare elektrische stroompje, is exponentieel afhankelijk van de afstand tussen punt en oppervlak. Door nu de punt in de x-en y-richting over het oppervlak te scannen en de z-afstand zo te regelen dat de tunnelstroom constant is, verkrijgt men een hoogtekaart waarin ieder oppervlakte-atoom een heuvelkje vormt. Met enige interpretatie maakt men met deze techniek de oppervlakte-atomen direct zichtbaar. Zo heeft men nu ook afbeeldingen van de 7x7-structuur van het Si(111)-oppervlak, 25 jaar nadat Schlier en Farnsworth ontdekten dat er wat gek met het oppervlak van siliciumkristallen aan de hand was. De werkelijkheid bleek toch anders te zijn dan de meeste modellen voorspelden.

omdat het openen niet elektrostatisch wordt geactiveerd, maar louter wordt gedreven door de 'veerkracht' van de brug. Een groot verschil tussen inschakel- en uitschakeltijd is van belang voor toepassingen als informatie-opslag. De combinatie van elektrische en mechanische schakeleffecten biedt wellicht de mogelijkheid om deze gewenste eigenschappen te bereiken zonder dat men zeer complexe structuren moet synthetiseren. Die complexe structuren lijken wel nodig als we alleen gebruikmaken van geleidbaarheidsverschillen bij constante moleculvorm.

Gemengde circuits

Het blijkt mogelijk te zijn om moleculaire systemen te ontwerpen en te synthetiseren, waarvan de eigenschappen verwant zijn aan die van (halfgeleider)dioden of zelfs overeenkomen met een schakelaar. Met behulp van licht kunnen we elektronentransport in zulke systemen bestuderen zonder de noodzaak daaraan draden te verbinden. Dat geeft ten onrechte de indruk dat het bedradingsprobleem in moleculaire elektronica — hier streng gedefinieerd als elektronica bestaande uit circuits met monomoleculaire componenten — eenvoudig oplosbaar is door gebruik te maken van licht voor de communicatie tussen de circuits ('moleculaire chips') en de buitenwereld.

Om het algemeen geclaimde miniaturiseringsvoordeel van moleculaire elektronica te realiseren, is een dichte pakking van moleculen gewenst. De golflengte van licht bedraagt echter een veelvoud van de afmetingen van moleculen. Het is derhalve onmogelijk uitsluitend één van de componenten te belichten; we kunnen een lichtbundel nooit met een grotere nauwkeurigheid richten dan de golflengte van het gebruikte licht.

Door speciale belichtingstechnieken kan men deze beperking ten dele omzeilen, maar het is voornamelijk onmogelijk om tegelijkertijd een groot aantal dicht bij elkaar gelegen punten te belichten. Realistischer lijkt het dan ook voorlopig om niet te streven naar elektronische circuits met monomoleculaire componenten, maar naar circuits met componenten die een supramoleculaire structuur bezitten. Met supramoleculaire structuur bedoelen we in dit geval georganiseerde verzamelingen van een groot aantal moleculen. Daardoor gaat natuur-

lijk het beoogde miniaturisatievoordeel ten dele verloren.

Met deze supramoleculaire benadering zijn reeds interessante resultaten behaald door moleculen te oriënteren in lagen die slechts één of enkele moleculen dik zijn. We moeten daarbij wel bedenken dat men momenteel in de halfgeleider-technologie laagstructuren van vergelijkbaar geringe dikte kan vervaardigen. Daarbij treden eveneens de quantiserings- en plaatsonzekerheidsfenomenen op die zo kenmerkend zijn voor de moleculaire microkosmos. Wat dat betreft is er duidelijk sprake van een samenkomen van de afmetingen die realiseerbaar zijn met enerzijds moleculaire systemen en anderzijds gebruikelijke halfgeleidermaterialen. Wellicht ligt een combinatie van beide benaderingen niet al te ver weg. Deze combinatie zou dan kunnen leiden tot een soort gemengde circuits, die bestaan uit supramoleculaire componenten die via specifieke chemische bindingen geplaatst zijn op bepaalde plaatsen in een overigens 'conventioneel' micro-elektronisch circuit.

Literatuur

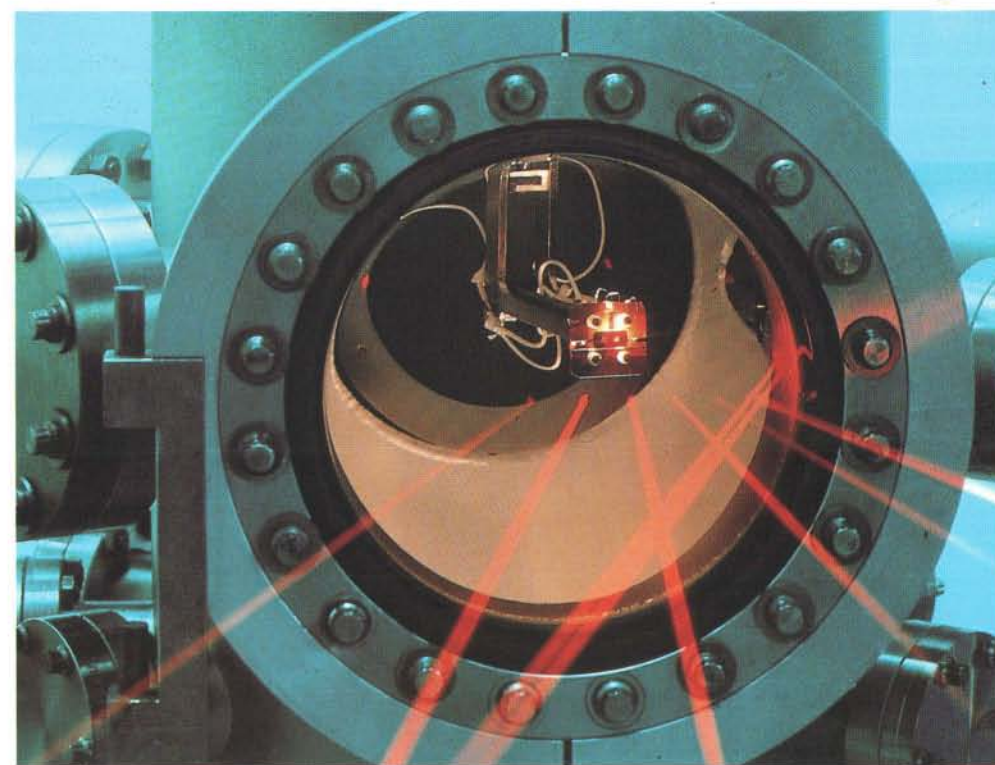
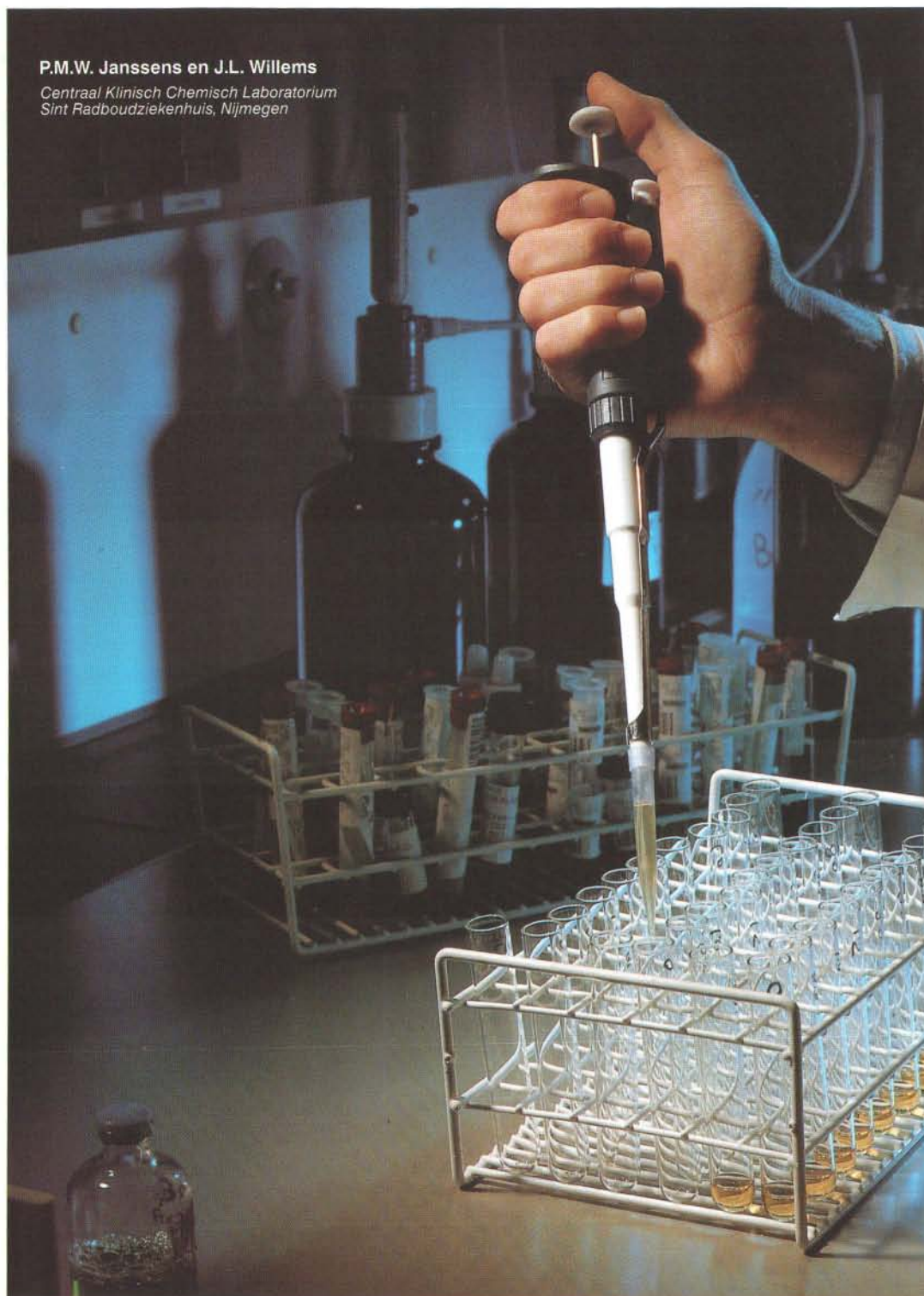
- Boer ThJ de. Met kromme pijl en vishaak — Reactiemechanismen in de organische chemie. *Natuur & Techniek* 1989; 57: 11, 856-871.
Verhoeven JW. Elektronendonor-acceptor-systemen; moleculaire elektronica in wording? *Chemisch Magazine* 1988; 12, 769-774.
Hooff CAA van. Chemie in twee dimensies: halfgeleiderstructuren. *Chemisch Magazine* 1989; 11, 689-692.
Gamov G. Mr Tompkins in Paperback. Cambridge, Cambridge University Press, 1965.

Bronvermelding illustraties

- Leo van Noort, Amsterdam: pag. 14-15, 4.
Zaadun BV, Enkhuizen: 3.
Optilas, Alphen a/d Rijn: 7.
Asea Brown Boveri, Basel: 11.
De overige afbeeldingen zijn afkomstig van de auteur.

P.M.W. Janssens en J.L. Willems

Centraal Klinisch Chemisch Laboratorium
Sint Radboudziekenhuis, Nijmegen



11

gen in elkaar en ontstaat er een oninteressant 'natuurlijk' materiaal.

De kunstmatige materialen maken het mogelijk tot aan de grenzen van de fysische eigenschappen te gaan. Dit valt te illustreren aan de hand van ijzer. Ijzer heeft een hoge verzadigingsmagnetisatie maar een lage permeabiliteit (magnetisch 'geleidingsvermogen'). Deze lage permeabiliteit hangt samen met de kristallijne eigenschappen van het ijzer. Voor bepaalde toepassingen, zoals een opnamekop in videorecorders en cassettespelers, wil men juist de combinatie van hoge verzadiging en hoge permeabiliteit. Eigenlijk zou amorf ijzer ideaal zijn, maar dat bestaat niet; ijzer is altijd kristallijn. Wel bestaan er amorfe ijzerlegeringen zoals FeCrB.

Engelse drop

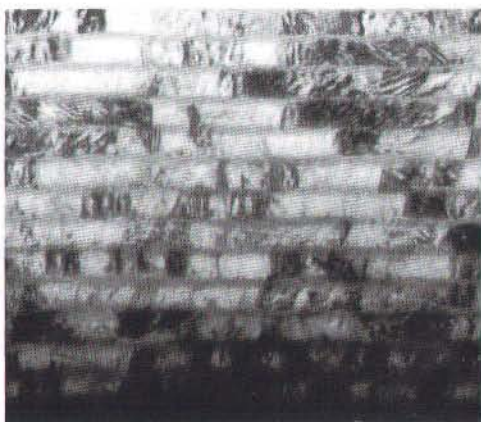
In zeer kleine kristallen kan de magnetisatie de snelle veranderingen van de anisotropie van de ene korrel ijzer naar de andere niet meer volgen

en treedt er een soort middeling van de magnetisatie op; hierdoor neemt de permeabiliteit toe. Er is namelijk een minimale afmeting nodig — de Blochwand-dikte — om de magnetisatie te kunnen veranderen. Bij ijzer is dat 55 nm. Het ideale materiaal realiseert men als volgt. Men laat een dunne (10 nm) laag ijzer groeien; na onderbreking van de groei deponereert men een laag amorfe ijzerlegering, FeCrB, met een dikte van 5 nm. Hierna hervat men de groei van de volgende laag ijzer met een dikte van 10 nm. De ijzerkristallen moeten opnieuw kiemen en blijven daardoor klein, veel kleiner dan de Blochwand-dikte. Nadat men dit vele malen heeft herhaald, beschikt men over een Engelse-dropstructuur met de gewenste magnetische eigenschappen.

Uit de voorbeelden mag men de conclusie trekken dat de techniek van het afzetten van atomaire lagen in het stadium van toepassing gekomen is. We zullen die kunstmatige laagstructuren straks terugvinden in transistoren, lasers, magneetkoppen en magneto-optische platen.

de epitaxiale laag die deze spanning kan houden zonder dat er verschuivingen van atomen in optreden, is afhankelijk van de druk. Hoe hoger de druk, des te geringer de kritische laagdikte. Bij een verhouding tussen germanium en silicium van 1:4 (een verschuiving van de ideale roosters van ongeveer 0,8%) is de kritische laagdikte ruim 0,1 μm . Deze dikte is voldoende voor toepassing in elektronische schakelingen.

De epitaxiale SiGe-laag heeft een aanzienlijk kleinere bandafstand dan silicium. Dit komt gedeeltelijk door de aanwezigheid van de germaniumatomen, maar is voor een even groot deel een gevolg van de grote elastische spanning van de samengedrukte laag. Dit betekent opnieuw dat de atomen — bij wijze van spreken — van kleur veranderen en een soort roodverschuiving vertonen.



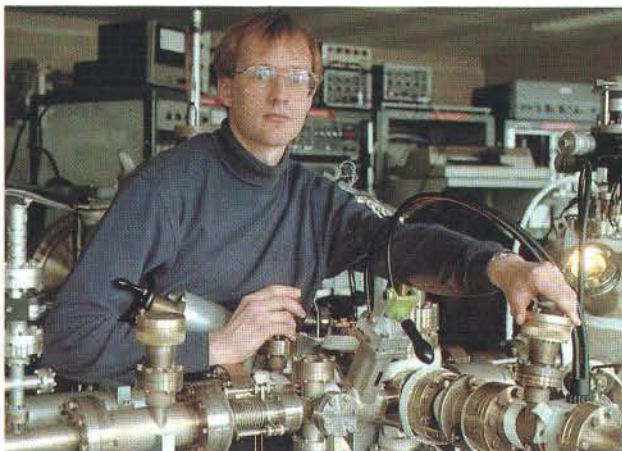
8

In algemene zin kan men zeggen dat de siliciumtechnologie er in de toekomst een vrijheidsgraad verkrijgt door de mogelijkheid een epitaxiale laag te groeien, die dus een andere bandafstand heeft. Hierdoor zijn snellere en betere transistoren mogelijk geworden.

De techniek om atoomlaag voor atoomlaag materialen op te bouwen, beperkt zich niet tot de halfgeleidermaterialen die men toepast in IC's en lasers. Het begint een algemene methode te worden om kunstmatige materialen te fabriceren; kunstmatig in die zin dat de natuur ze niet had kunnen bedenken. Het zijn materialen die bestaan uit een stapeling van atoomlagen met atomair scherpe overgangen. Zo'n materiaal is chemisch volledig uit evenwicht en kan dan ook alleen maar ontstaan bij relatief lage temperatuur. Bij verhitting diffunderen de la-



9



10

8. Om materiaal met hoge verzadiging en hoge permeabiliteit te verkrijgen, groeit men kristallen die bestaan uit dunne laagjes polykristallijn ijzer (10 nm) afgewisseld met laagjes amorf FeCrB (5 nm).

9. De magneto-optische plaat bevat een magnetische multilaag van afwisselend kobalt- en platinalagen van enkele atomen dik.

10. Een onderzoeker toont de apparatuur waarmee groei- en STM-experimenten zijn gedaan.

11. Een recente techniek voor de besturing van oppervlakken in een UHV-ruimte maakt gebruik van laserstralen.



Chemie in de kliniek

Geneeskunde is vanouds een bewaamheid die uitgaat van ervaringen. Al dan niet juiste, vaak intuïtieve veronderstellingen van geneesheren golden als verklaring voor ziekten. De kennis over het leven en het menselijk lichaam nam explosief toe; de dokter van weleer die van alle markten thuis was, groeide in de laatste eeuw uit tot een team van specialisten met elk een apart stuk kennis. Zo'n artsenteam is steeds beter in staat de oorzaken van ziekten op te sporen. De bijdrage van de basiswetenschap scheikunde was hierbij van grote betekenis. Vandaag de dag kan de scheikunde helpen bij het voorkomen en het vaststellen van ziekten maar ook bij het volgen van de ontwikkeling van een ziektebeeld. De medische specialist maakt daarom gebruik van een verscheidenheid aan laboratoriumbepalingen - de bijdrage van de klinische chemie.

Automatisering is in vele laboratoria al ver doorgevoerd. Toch zijn er nog handelingen die de analist zelf uitvoert, zoals deze monstervoorbereiding met behulp van een pipet.

MENSEN METEN

Iedereen heeft wel eens gehoord van bloedgroepen, van cholesterol in het bloed of van suiker in de urine. Dit vormt slechts het topje van een ijsberg. Sla een willekeurig geneeskundig leerboek open en je realiseert je bij hoeveel aspecten van de geneeskunde chemie om de hoek komt kijken. Op talloze plaatsen verwijzen uiteenzettingen naar resultaten van chemisch laboratorium-onderzoek. Eenvoudige ionen komen aan bod maar ook ingewikkelde chemische structuren zoals die van eiwitten of DNA-molekulen.

In de tegenwoordige geneeskunde is scheikunde even prominent aanwezig als in onze hedendaagse maatschappij. Maar de geneeskundige chemie ofwel *klinische chemie* speelt zich af achter gesloten deuren; het grote publiek heeft er weinig weet van. Dagelijks worden grote aantallen monsters geanalyseerd in omvangrijke laboratoria die verbonden zijn aan ziekenhuizen en bloedbanken. In een laboratorium van een middelgroot ziekenhuis werken al snel meer dan vijftig analisten, vaak met uiterst geavanceerde apparatuur. Zij verrichten vooral metingen aan bloed- en urine-monsters maar in principe kan elke lichaamsvloeistof door hen geanalyseerd worden. En het laboratorium be-

1. Via de placenta komen antistofmolekulen van de moeder terecht in het bloed van de resus-positieve ba-

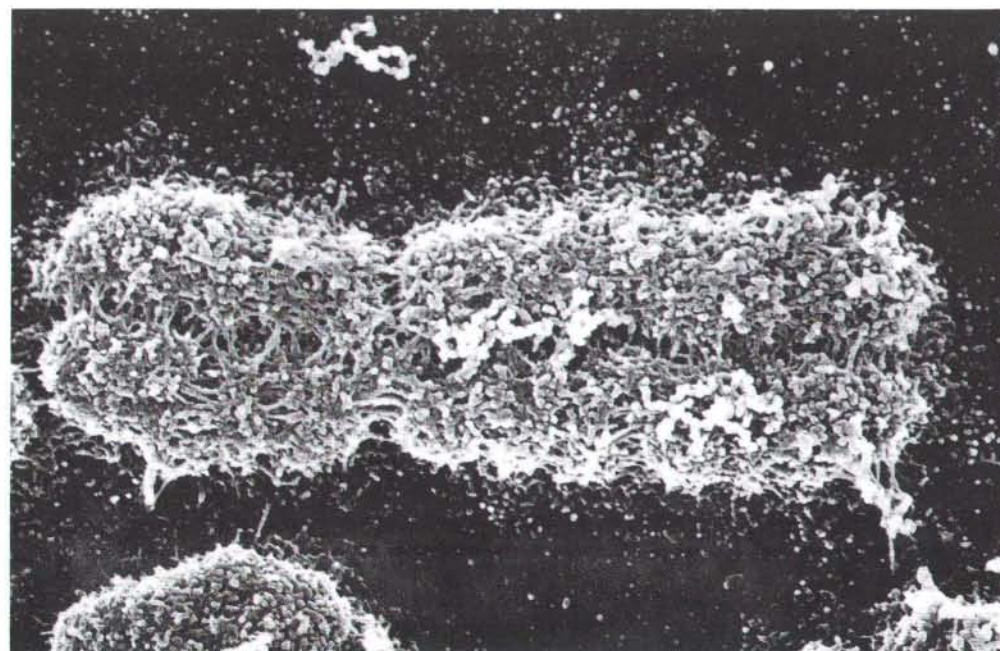
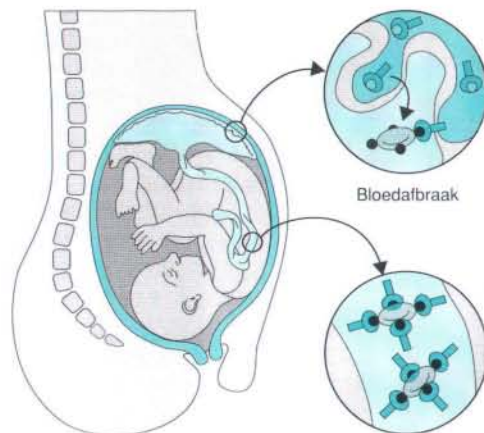
by. Zij grijpen daar aan op de rode bloedcellen en veroorzaken daarmee de afbraak van het kinderbloed.

2. Onderzoek aan DNA behoort tot de mogelijkheden bij het speuren naar oorzaken van ziekten. Dit is een

scanning-electronenmicroscopische opname van een chromosoom (18 000 maal vergroot).

3. In lichaamsvloeistoffen en weefsels kan een analist vele stoffen meten die ons

kunnen informeren over het functioneren van ons lichaam.



2

Manipulatie van de bandafstand

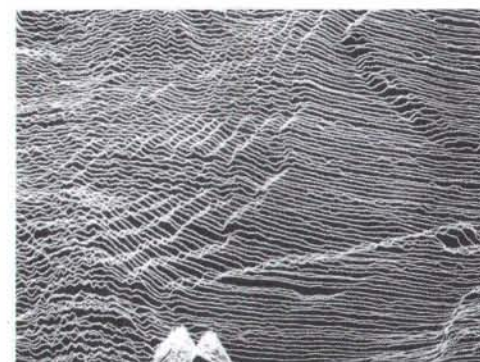
Voor meer dan 99% van alle geïntegreerde elektronische schakelingen, de welbekende IC's, vormt silicium het basismateriaal. Dit materiaal heeft perfecte eigenschappen. Er is echter een nadeel. Silicium kan niet op eenvoudige wijze worden gecombineerd met een andere halfgeleider, zoals dat wel het geval is bij de gallium-arseen-familie waar combinatie met aluminium, indium en fosfor mogelijk is.

In chemisch opzicht is de logische partner van silicium het element germanium (één plaats naar beneden in het Periodiek Systeem). De kristalroosters schelen echter 4% in afmeting. Dit is een te groot verschil om epitaxiaal een laag van enige dikte te kunnen laten groeien; de germaniumatomen zijn gewoon te groot. Indien men alleen naar een goed op elkaar passen van de roosters kijkt, dan is GaP de ideale partner met een verschil in roosterafmeting van slechts 0,4%. Helaas is dit chemisch een bijzonder lastig systeem, daar gallium en fosfor *dote-ringsatomen* zijn in silicium: deze atomen kun-

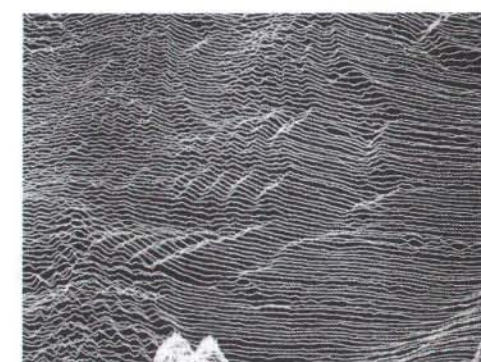
nen het siliciumrooster verontreinigen en maken zo geleiding door het kristal mogelijk. Als er een klein beetje diffusie optreedt veranderen de elektrische eigenschappen van silicium enorm en kan er geen schakeling meer mee worden gemaakt.

Zachte landingen

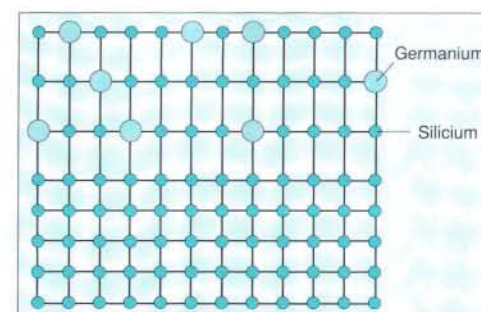
De oplossing is gevonden door via molekulair-bundelepitaxie (MBE) een mengsel van silicium en germanium laag voor laag te laten groeien op een siliciumlaag. Deze heeft een bepaald rooster. Daarop komen de silicium- en germaniumatomen 'zachtjes' neer. Dankzij de covalente chemische bindingen wordt chemisch gezien hetzelfde rooster voortgebouwd. De germaniumatomen zijn weliswaar wat groter dan siliciumatomen, maar ze reageren chemisch op dezelfde wijze. Om de gemengde laag toch passend te krijgen moeten alle atomen wat dichter op elkaar komen. Daarbij ontstaat een hoge druk, veroorzaakt door de covalente bindingskrachten tussen de atomen. De dikte van



6a



6b



7

5. Een opname met een transmissie-elektronenmicroscop toont epitaxiaal gegroeide GaAs- en AlAs-lagen. Deze lagen kunnen op elkaar groeien zonder verstoring van de regelmatige atomaire structuur.

7. Bij het epitaxiaal groeien van een mengsel van silicium- en germaniumatomen op een siliciumoppervlak, blijken de germaniumatomen door hun grootte een flinke spanning in het kristal te veroorzaken.

6. Deze STM-opnamen van een siliciumoppervlak tonen de veranderingen die binnen tien seconden aan het oppervlak kunnen optreden.

Het oppervlaktelaagje bleek niet of nauwelijks geschikt voor een nieuwe toepassing zoals een nieuwe transistor of laser. Het feit dat de laag alleen kon bestaan in een ultrahoog vacuüm vormde een beletsel. Wel was de belangstelling gewekt voor lagen met een dikte van slechts enkele atomen en een gedeelte van de aandacht verschoof vervolgens van het bekijken van schone oppervlakken naar het maken van uiterst dunne afgedekte lagen. Met name met de opdamptechniek MBE (moleculaire bundelepitaxie) en de chemische (katalytische) techniek MOCVD (metal organic chemical vapour deposition) kon men lagen laten groeien bij een relatief lage temperatuur. Daarbij wordt atoomlaag na atoomlaag beheerst afgezet, zodat scherpe overgangen met atomaire afmetingen tussen de lagen worden bereikt. De lage temperatuur die men bij deze technieken gebruikte is hierbij essentieel. Bij hogere temperaturen worden de grensvlakken minder scherp begrensd doordat diffusie optreedt. De groeisnelheden zitten bij ongeveer één monolaag per seconde.

Lasers

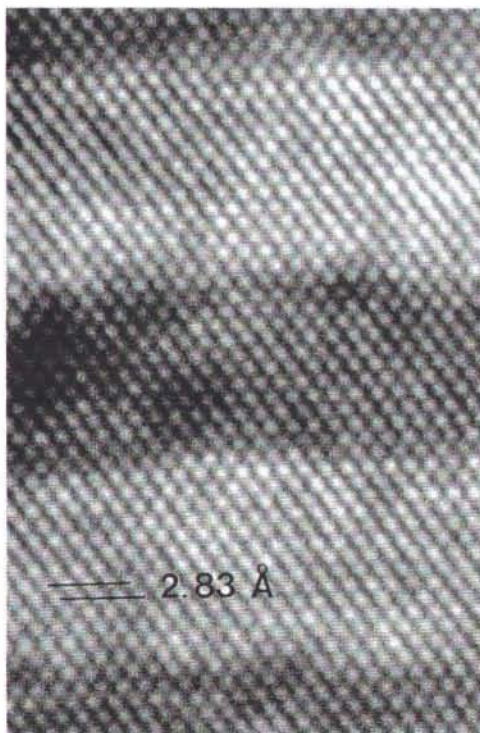
Voor een halfgeleider-laser is perfect kristallijn materiaal nodig met daarin een zogenaamde actieve laag met een kleinere bandafstand. In een halfgeleider zijn in principe twee banden van energieniveaus: de valentieband en de geleidingsband. De geleidingsband kunnen we opvatten als de 'aangeslagen' toestand. Een aantal elektronen uit de valentieband springen bij kamertemperatuur in de geleidingsband, waarbij zij 'gaten' achterlaten. Zowel de elektronen in de geleidingsband als de gaten in valentieband kunnen zich vrij door het kristal bewegen. Dit gaat vooral goed als het kristal eenkristallijn is, perfect geordend.

In het kristal van een halfgeleiderlaser is de ordening perfect; alle atomen zitten op hun plaats. Er is echter een laag in het kristal die een andere samenstelling heeft en daardoor een kleinere bandafstand. De elektronen en gaten vallen als het ware in deze potentiaalput en verzamelen zich daar. Hun aantal neemt toe totdat de elektronen tegelijkertijd combineren met de gaten onder uitzending van laserlicht, lichtstralen met dezelfde golflengte die in fase zijn.

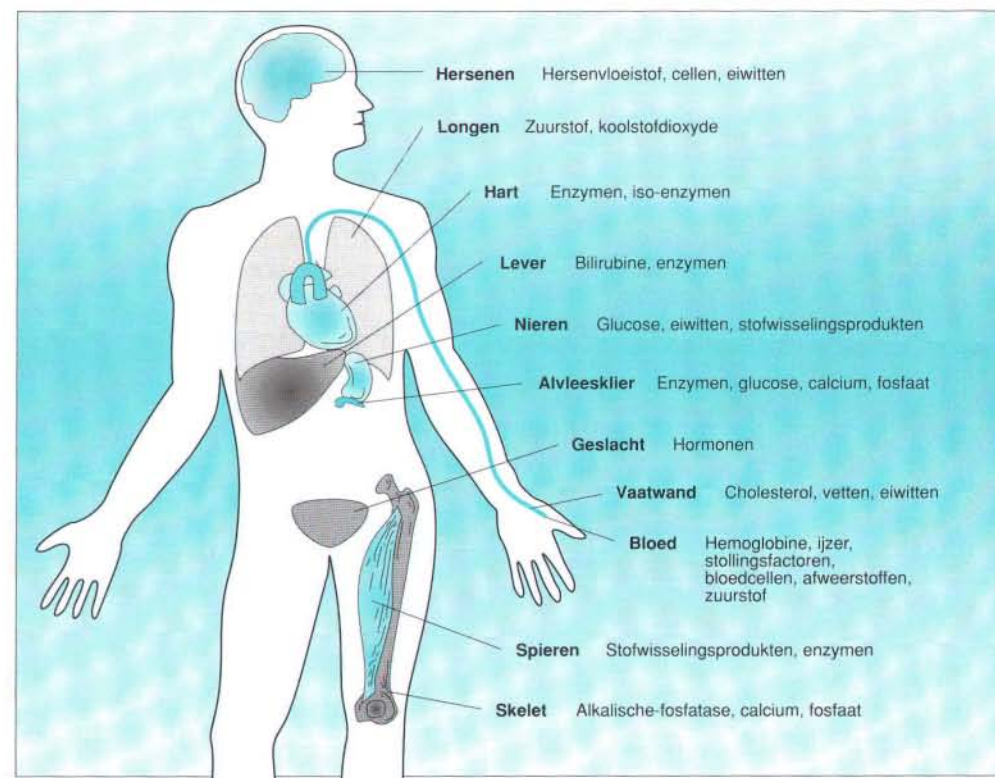
Een bekend kristallijn systeem is het AlGaAs/GaAs-systeem. De kristalroosters van

AlGaAs en GaAs passen perfect op elkaar. Op AlGaAs laat men een dun laagje GaAs groeien, waarbij het kristalrooster precies wordt voortgezet, waarna vervolgens weer AlGaAs wordt opgedampt. Deze vorming van een dun laagje op een kristalrooster heet *epitaxie*. Voor dit groeiproces wordt de opdamptechniek MOCVD gebruikt waarbij gallium, in de vorm van trimethylgallium, en arseen, als arseenhydride, via de gasfase worden aangevoerd en op het kristaloppervlak ontleden tot gallium en arseen.

Al in de jaren zeventig kwamen er vanuit de vaste-stoftheorie ideeën naar voren over nieuwe fysische eigenschappen van lagen die nog slechts enkele atoomlagen dik zijn. Bij deze tweedimensionale structuren gaan quantumeffecten een belangrijke rol spelen. Een halfgeleiderlaser met een actieve laag van enkele atoomlagen dik heet een quantumput-laser. Dit is een zeer geavanceerd lichtbronnetje dat bijvoorbeeld een toepassing vindt in de populaire CD-speler en zodoende zijn entree in de markt heeft gedaan.



5



3

perkt zich niet alleen tot vloeistoffen; ook extracten van cellen en weefsels kan men onderzoeken.

Eeuwenlang bestond de geneeskunde zonder scheikunde; kan ze vandaag de dag nog zonder? Nee. Soms dienen uitslagen van chemische bepalingen alleen ter bevestiging van vermoedens van een arts. In andere gevallen zijn de gegevens onmisbaar voor verder onderzoek of verdere behandeling. Maar klinisch-chemisch onderzoek bestaat niet alleen voor zieke mensen. Ook gezonde mensen lenen zich regelmatig voor onderzoek.

Gezonde mensen als proefkonijn

Gezonde mensen onderzoeken we niet omdat ze klachten hebben maar juist om ziekten in een vroeg stadium te onderkennen of te voorkomen. De betekenis van de scheikunde is dan dat een dreigende kwaal chemisch op te sporen is, terwijl de ziekte nog niet aan het lichaam zichtbaar is.

Onderzoek van mensen zonder klachten kennen we in de eerste plaats van keuringen zoals we die ondergaan bij aanvaarding van een nieuwe baan of bij het afsluiten van een levensverzekering. Bekende voorbeelden zijn de tests op de aanwezigheid van suiker en eiwit in de urine, om suikerziekte en nierproblemen op het spoor te komen. Bij keuringen voor levensverzekeringen laten artsen vaak het cholesterolgehalte in het bloed bepalen om na te gaan of de verzekerde een verhoogde kans op hart- en vaatziekten heeft. Soms zijn meer specifieke bepalingen nodig. Dit geldt bijvoorbeeld voor medewerkers in gezondheidscentra die tijdens hun werk in contact kunnen komen met het hepatitis-B-virus. Dit virus kan een ernstige leverontsteking veroorzaken. Bij aanstelling van deze werknemers gaat een arts na of ze immuun zijn tegen hepatitis-B; hebben ze al antistoffen tegen het virus? Is dit niet het geval dan krijgen de nieuwelingen een vaccin. Dit is het verzwakte of dode virus waartegen hun lichaam dan antistoffen gaat maken.



4. Een screenings-test kan gemakkelijk en snel een globaal beeld geven. De strip test onder andere op de aanwezigheid van glucose, eiwit en rode en witte bloedcellen in de urine.

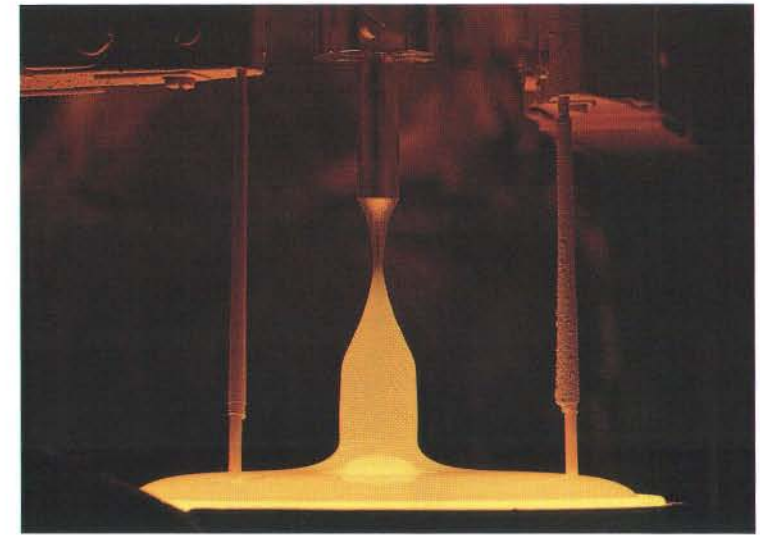
4

We kunnen ziekten voorkomen bij een individu of bij de hele bevolking. Een voorbeeld van het eerste is het geven van anti-resus-antistof na bloedgroeponderzoek bij zwangere vrouwen. Dit is van belang wanneer een resus-negatieve vrouw voor een tweede keer zwanger is van een resus-positieve baby. Tijdens de eerste zwangerschap geeft dit geen problemen maar bij de geboorte van de baby kan wat kinderbloed via wondjes in het bloed van de moeder terecht komen. Als antwoord hierop zal de moeder antistofmolekelen aanmaken tegen deze voor haar vreemde bloedcellen. Is tijdens een volgende zwangerschap het kind weer resus-positief, dan kunnen de antistofmolekelen van de moeder een afbraak van de bloedcellen van de ongeboren baby veroorzaken. Dit gevaar kunnen we voorkomen door van zwangere vrouwen de bloedgroep te bepalen. De resus-negatieve vrouwen krijgen dan, direct na de eerste bevalling van een resus-positief kind, bepaalde eiwitten ofwel anti-resus-antistoffen toegediend. Dit eiwit moet voorkomen dat de

moeder antistofmolekelen zal gaan vormen tegen het bloed van een volgende resus-positieve baby.

Epidemiologen onderzoeken de verspreiding van ziekten, niet alleen van epidemieën. Meestal onderzoeken zij slechts een beperkte regio of bevolkingsgroep, om een beeld te krijgen van de hele bevolking. In het begin van de jaren tachtig bijvoorbeeld zijn epidemiologen de verspreiding nagegaan van dikke-darmkanker. Onderzoekers hebben uitwerpselen van mensen uit Zoetermeer en omstreken onderzocht op de aanwezigheid van bloed. Bloed in de faeces kan namelijk duiden op darmzweren of darmtumoren. Ze gebruikten een chemische methode waarmee ze hoeveelheden bloed konden waarnemen die met het blote oog niet zichtbaar waren.

Onderzoek met chemische middelen aan gezonde mensen roept telkens weer heftige discussie op. Een winst aan kennis weegt niet altijd op tegen de risico's die aan dat onderzoek verbonden kunnen zijn.



4. In vele technische toepassingen gebruikt men eenkristallen van silicium. Deze kristallen laat men groeien op een klein entkristal dat zeer langzaam uit een hete smelt wordt getrokken. Door de trage beweging treden er geen verstoringen van de kristalstructuur op. Voor latere toepassingen zal het eenkristal in dunne plakjes worden gesneden.

4

INTERMEZZO

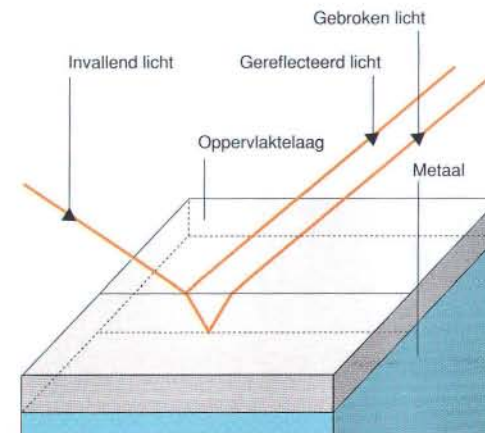
kleur) vertoont, dan zijn de twee meetgegevens eenduidig om te rekenen in een dikte en een brekingsindex van die laag. Als de laag wel licht absorbeert, kan men de absorptie-coëfficiënt berekenen uit zogenaamde spectraalmetingen, dat wil zeggen metingen bij een groot aantal golflengtes.

In gunstige gevallen, zoals bijvoorbeeld in het geval van een oxydelaag op silicium, komt de nauwkeurigheid van de ellipsometrische methode overeen met een laagdikte van 0,01 nm, dat is een paar hon-

derdste deel van de dikte van een enkel atoom! Het is natuurlijk niet zo realistisch om te geloven in dunne schijfjes van een atoom. Men moet dat dan ook interpreteren als zien we een paar honderdste van een atomaire monolaag — een oppervlak met hier en daar een vreemd atoom erop.

Deze enorme nauwkeurigheid kan alleen in een relatieve meting worden gehaald. Relatieve meting houdt in dat men eerst het schone substraat meet, waarna men onder exact dezelfde experimentele omstandigheden metingen verricht aan het substraat met de mono-atomaire laag erop. Men voert dus een verschilmeting uit.

Hoe ziet de bovenste atoomlaag van een siliciumkristal eruit? Om dit te weten te komen, kunnen we opnieuw een relatieve meting uitvoeren. De adsorptie van een monolaag van zuurstof of een ander reactief gas zal de dangle bonds van het siliciumoppervlak compenseren. De oppervlaktelaag van het silicium zal dan qua eigenschappen weer lijken op het onderliggende kristal. Door de adsorptie verdwijnt het oppervlaktelaagje als het ware. De ellipsometrische meting laat het totale effect zien van het ontstaan van een monolaag geadsorbeerde zuurstof en het effectief verdwijnen van het 'anders zijnde' top laagje silicium. Door ijking kan de onderzoeker het effect van de zuurstoflaag onafhankelijk bepalen, zodat hij de informatie over het verdwenen laagje apart verkrijgt.



I-2

kende atomaire rangschikking. Men vermoedde dat dit directe gevolgen had voor chemische reacties aan deze oppervlakken, de chemische katalyse.

Het leek op dat moment interessant om te kijken naar de elektronenstructuur van die buitenste atoomlaag. Het feit dat de oppervlakte-atomen anders gerangschikt zijn, zal aanleiding geven tot ander gedrag van elektronen. Aan het oppervlak van het siliciumkristal ontstaat een atomair laagje van een nieuwe halfgeleider en het was de vraag of daar een elektronische toepassing voor was.

De elektronenstructuur kan zeer volledig worden beschreven in een zogenaamd bandenplaatje, waarin de verdeling van elektronen over diverse energieniveaus is weergegeven. Je zou het ook kunnen zien als de 'kleur' van de bovenste atoomlaag of de kleur van de opper-

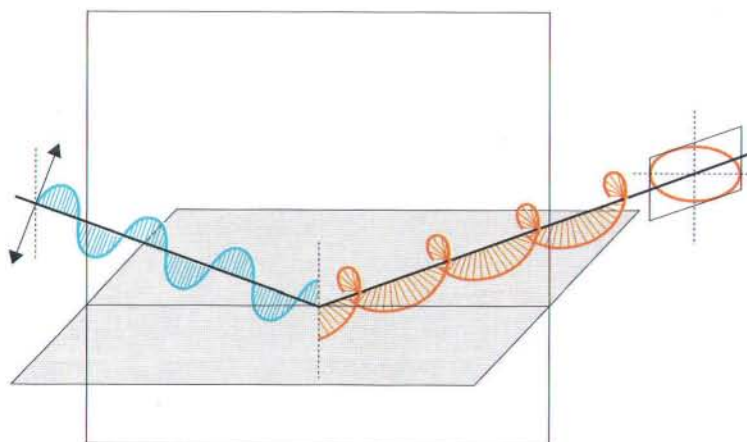
vlakke-atomen, die afwijkt van de 'kleur' van het kristal. Om die kleur te meten kan een optische techniek worden gebruikt waarbij men de reflectie van een gepolariseerde lichtbundel aan een oppervlak meet. Deze techniek, *ellipsometrie* genoemd, was al aan het eind van de vorige eeuw bekend, maar een toepassing op dit soort problemen was volstrekt nieuw (zie *Intermezzo*).

Door de ellipsometrische metingen bij een groot aantal golflengten uit te voeren, stelde men vast dat de bandenstructuur van de top-laag van schoon silicium nogal verschilt van die van het inwendige van het kristal. In eenvoudige termen zou je kunnen zeggen dat de gewone silicium-atomen paars zijn en de oppervlakte-atomen rood. Met behulp van andere methoden is de elektronenstructuur later in veel meer detail bepaald.

Ellipsometrie

De elektronenstructuur van de atoomlaag aan het oppervlak van een kristal kan men bestuderen met een optische techniek, ellipsometrie. Men bestudeert met deze meetmethode de verdeling van de elektronen in die laag over diverse energieniveaus. Deze elektronenverdeling is van invloed op de reflectie van gepolariseerd licht aan het oppervlak zodat het meten van deze reflectie informatie verschaft over de elektronenverdeling aan het kristaloppervlak.

Deze reflectie is volledig te beschrijven met behulp van de klassieke optica. Als een lineair gepolariseerde lichtbundel op een oppervlak valt, wordt in het algemeen een elliptisch gepolariseerde lichtbundel gereflecteerd. Men kan nu de stand van de ellips en zijn assenverhouding of ellipticiteit meten. In optische termen: men meet amplitude-verschillen en faseverschillen die optreden als een oppervlak de lichtbundel reflecteert. Als een dunne laag van een optisch bekend materiaal geen absorptie (geen



I-1

I-1. Bij ellipsometrie reflecteert een lineair gepolariseerde lichtbundel op een oppervlak. De gereflecteerde elliptisch gepolariseerde lichtbundel verschaft twee meetgegevens: de ellipsstand en de assenverhouding van de ellips. Daaruit kan de onderzoeker de dikte en de brekingsindex van een laag afleiden.

I-2. Bij de reflectie aan een oppervlak waarop zich een dunne laag bevindt, geven de ellipsometrische gegevens ook informatie over dikte en brekingsindex van de laag.

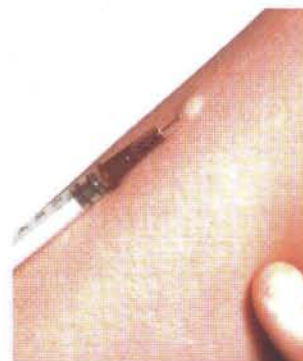
Zoeken naar ziekte

Dikwijls kan een dokter uit de klachten niet direct afleiden wat er mis is met de patiënt. Toch zal een arts de aard van de ziekte willen vaststellen; hij zal tot een *diagnose* proberen te komen. Hiertoe ondervraagt hij de patiënt, verricht hij lichamelijk onderzoek en laat hij laboratoriumonderzoek uitvoeren. Deze verschillende onderzoeksmethoden vullen elkaar aan. Diagnose stellen is als het ware het maken van keuzen: kiezen tussen alternatieven, de aanwezigheid van ziektekenmerken bevestigen en andere kwalen uitsluiten. Zo ontstaat er een idee over de ziekte van de patiënt.

Uiteraard let een arts bij het stellen van een diagnose op veel voorkomende. In eerste instantie zal hij niet denken aan uiterst zeldzame ziekten. Een arts kiest daarom altijd met zorg de laboratoriumonderzoeken die hij laat verrichten; hij is niet uit op onverwachte gebreken die niets met de klachten te maken hebben. Het verrichten van te veel laboratoriumonderzoek is niet alleen kostbaar maar schept ook gemakkelijk verwarring. Tussen veel meetuitkomsten komt altijd wel een afwijkende uitslag voor. De ideale testen in het eerste stadium van onder-

zoek zijn daarom gevoelig voor de meest voorkomende ziekten en kunnen daartussen onderscheid maken. Het is belangrijker eerst een globaal onderscheid te maken tussen verschillende categorieën van ziekten, dan precies en definitief een bepaalde ziekte vast te stellen. De *screenende onderzoeken* dienen een dergelijke aanpak. Screenende onderzoeken bestaan uit een of enkele eenvoudige testen, die snel een globaal beeld kunnen geven. Bovendien zijn deze testen goedkoop en weinig ingrijpend voor de patiënt. Duurdere of ingrijpende onderzoeken worden pas uitgevoerd als er meer concrete aanwijzingen bestaan voor een bepaalde ziekte.

Een goed voorbeeld van screenend onderzoek is het opsporen van ziekten die veroorzaakt worden door erfelijke defecten in enzymen die suikerketens afbreken. Deze enzymen zijn aanwezig in lysosomen, de celonderdelen waarin de vertering binnen de cel plaatsvindt. Bij afwijkingen in deze enzymen verschijnen in de urine restanten van niet-afgebroken suikerketens (oligosachariden). De samenstelling van deze ketens hangt af van de enzymdefecten. Wanneer de arts bij zijn patiënt een lever- of miltvergroting opmerkt of een achterblijvende



5



6



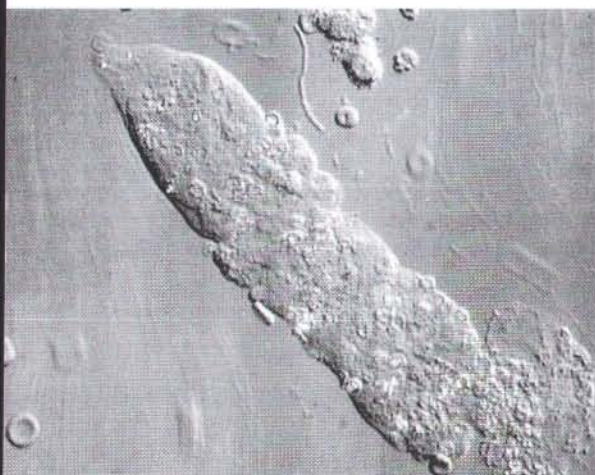
7

5, 6 en 7. De tuberculinereactie volgens Mantoux is een screeningstest op tuberculose. Tuberculose is een infectieziekte, die meestal de longen aantast. Besmetting vindt plaats door inademing van de tuberkelbacil. In de tropen en de subtropen komt tuberculose nog veel voor, maar in de westerse wereld is het een zeldzame aandoening geworden. Toch vindt nog screening plaats bij bepaalde groepen, zoals bij onderwijzend perso-

neel, buitenlandse werknemers en oud-patiënten. De test bestaat uit het in de huid spuiten van een oplossing met dode tuberkelbacillen, aan de buitenzijde van de onderarm (5). Bij iemand die besmet is of ooit is geweest ontstaat onderhuids een hard zweertje dat een arts met de wijsvinger kan vaststellen (6). Na 72 uur beoordeelt hij de reactie; een diameter van tien millimeter of meer is een positieve reactie (7).

mentale ontwikkeling bij een kind, dan vraagt hij om een laboratoriumonderzoek naar een mogelijk lysosomaal-enzymdefect. Op het laboratorium kijken ze eerst of er in de urine oligosachariden aanwezig zijn. Pas als dat het geval is zetten de onderzoekers een hele reeks tijdrovende enzymmetingen in. Deze metingen voor de vaststelling van het specifieke enzymdefect voeren ze uit op extracten van witte bloedcellen van de patiënt. Aan de hand van de resultaten van deze bepalingen kan de arts de ziekte definitief benoemen.

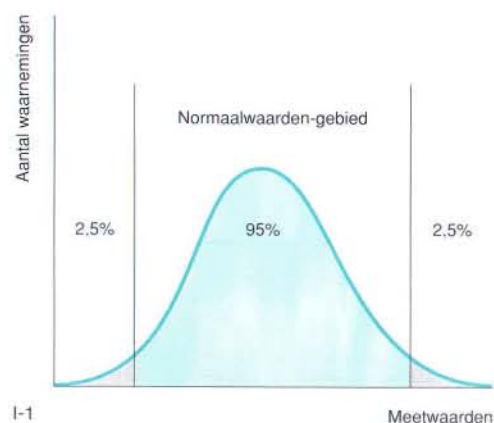
Een ander voorbeeld van screenend vooronderzoek is de inspectie van urinesediment, neerslag in de urine. Een arts kan dit laten doen om de oorzaak van bloed in de urine te achterhalen. Bloed in de urine kan namelijk het gevolg zijn van een aandoening van de nieren, de blaas of de urinewegen. Geen arts zou er over piekeren direct een stukje weefsel of *biopt* uit de nieren te nemen om de structuur van het nierweefsel te onderzoeken. Dit zou nodeloos belastend en riskant zijn voor de patiënt, zolang aandoeningen van blaas of urinewegen niet zijn uitgesloten. In het laboratorium kijken ze met de microscoop of er behalve cellen ook *cilinders* in het urinesediment aanwezig zijn. Die ci-



8

8. Een urinesediment dat rode bloedcellen en cilinders bevat, wijst op een defect in de nier.

Betekenis van meetwaarden



Eén uitslag krijgt pas betekenis na vergelijking met andere meetwaarden. Dit is op meerdere manieren mogelijk. Een manier is het naast elkaar bekijken van uitslagen van verschillende onderzoeken aan één patiënt. Een andere mogelijkheid is de vergelijking van resultaten van een en hetzelfde onderzoek bij verschillende mensen, zowel ziek als gezond.

Bijna geen enkele biologische eigenschap levert bij metingen een eenduidige waarde. Meestal variëren de waarden rondom een gemiddelde; meetwaarden vlakbij het gemiddelde komen vaker voor dan uitslagen verder van het gemiddelde verwijderd. De *frequentieverdeling*, waarin aangegeven is hoe vaak bepaalde waarden voorkomen, is karakteristiek. De vorm van de frequentieverdeling hangt af van de gemeten eigenschap en van de onderzochte groep.

Bij de bekendste verdeling, de *normale* of *Gauss-verdeling*, liggen de meetwaarden symmetrisch verdeeld rondom het gemiddelde. In een grafiek laat dat een soort klokform zien. Biologische meetwaarden (zoals enzymen in het bloed) tonen vaak een normale verdeling als de frequentieclassen in een logaritmische schaal zijn uitgezet langs de x-as.

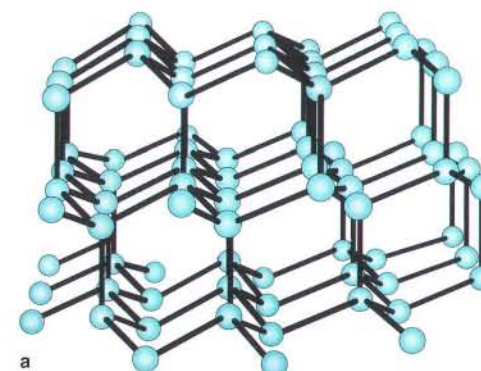
linders zijn buisvormige samenklontering van cellen die ontstaan in de buisjes van zieke nieren - vandaar de cilindervorm. Pas als er cilinders in de urine zijn aangetoond is het uitvoeren van een nierbioptie verantwoord. Dit voorbeeld maakt ook duidelijk dat de onderzoeken die volgen op screenend onderzoek met chemische testen lang niet altijd weer chemisch van aard zijn.

of meer atomen bevinden. Een *eenheidscel* is dat elementaire deel van het kristal waaruit door verplaatsing ervan langs drie kristalassen het gehele kristal kan worden opgebouwd, net alsof men dozen opstapelt.

De meeste kristallijne stoffen die we kennen, bestaan in feite uit een groot aantal aaneengegroeide kristalkernen. Men noemt ze daarom ook wel polykristallijn. Eenkristallen bestaan daarentegen werkelijk uit één kristal. Bekende vormen van eenkristallen zijn het silicium zoals dat wordt gemaakt en toegepast in de moderne halfgeleiderstechnologie. Edelstenen zijn eenkristallen die in de natuur voorkomen.

In een kubisch kristal, zoals ook silicium vormt, kan men diverse vlakken herkennen die de eenheidscellen steeds op dezelfde wijze doorsnijden. De ligging van de vlakken beschrijft men aan de hand van de zijden van de eenheidscel, *a*, *b* en *c*. Zo'n vlak doorsnijdt bijvoorbeeld drie eenheidscellen in de richting van *a* tegen twee eenheidscellen in de richting van *b*, terwijl het vlak evenwijdig loopt aan de *c*-as. De ligging van het vlak geeft men dan weer als (3*a*, 2*b*, ∞*c*) of (3, 2, ∞). Het is nogal lastig om in formules te werken met het begrip oneindig. Daarom geeft men vlakken liever aan met de reciproke waarden van het aantal doorsneden eenheidscellen, de zo genaamde Miller-indices (*hkl*). De reciproke waarden worden daarbij zo aangepast, dat zij alle hele getallen zijn. Het vlak in het voorbeeld beschrijft men dus met de Miller-indices (230). Een negatieve waarde van een Miller-index geeft men aan door een streep boven het getal te plaatsen.

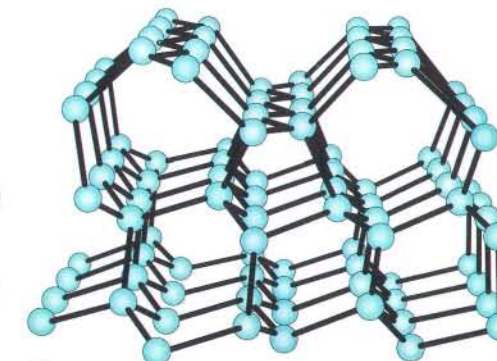
Si (111) ideaal oppervlak



a

3

Si (111) gereconstrueerd oppervlak



b

Atomen aan het oppervlak

De atomen aan het oppervlak zijn wel strikt geordend, maar deze ordening is gebaseerd op een andere eenheidscel dan binnen het kristal voorkomt. Dit komt doordat de oppervlakte-atomen zich herrangschikken in energetisch gunstigere posities. Daarbij ontstaan grotere eenheidscellen, waarin de normale eenheidscel een aantal malen past. Voor het splijtvlak Si(111) werd na splijten een 2x1-structuur gevonden. Het oppervlak was dus twee keer zo groot als de oorspronkelijke eenheidscel. Na verhitting veranderde dit in een 7x7-structuur. Het mooie van de LEED-methode is dat deze de nieuwe ordening aan het oppervlak vrij eenvoudig zichtbaar maakt. Een nadeel is dat het onmogelijk is met deze methode de posities van de atomen bepalen. Ook al is bekend dat de nieuwe eenheidscel 7 x 7 = 49 maal zo groot is als de eenheidscel, hoe die 49 atomen precies zijn gerangschikt valt uit deze metingen niet af te leiden.

Er volgde een enorme uitbreiding van de wetenschappelijke waarnemingen aan oppervlakken, waarbij steeds betere vacuümapparatuur werd gebruikt. In de jaren zestig stimuleerde de wetenschap zo een nieuwe nijverheidstak: de fabricage van hoog-vacuümapparatuur.

De 'kleur' van een atoom

In 1965 was aangetoond dat vele atomaire schone oppervlakken - vooral in de klasse van de halfgeleiders - beschikten over een afwij-

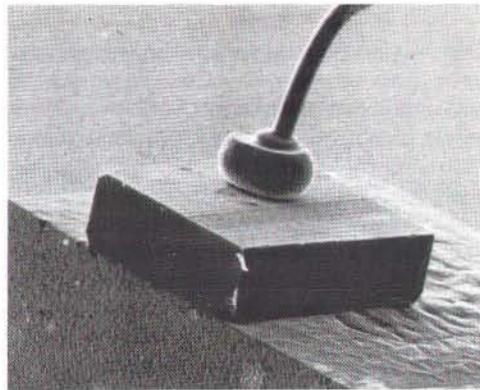
Je kunt uiteraard iedere geschiedschrijving laten beginnen bij Adam en Eva. Met de geschiedenis van het onderzoek van schone oppervlakken en chemische reacties daaraan, beginnen we gemakshalve in 1959 toen Schlier en Farnworth van Brown University in de V.S. een schoon oppervlak van een halfgeleider bekeken.

De kristallen die zij bestudeerden waren perfecte eenkristallen van silicium en germanium. Een atomair schoon oppervlak, oftewel een laag van atomen (atomaire laag) met dezelfde samenstelling als het zuivere kristal, verkregen ze door een kristal te splijten in ultrahog vacuüm of door een kristal zo lang in vacuüm te verhitten dat alle vreemde atomen eraf zijn gevlogen.

Bungelende bindingen

Zo'n oppervlak kunnen we beschouwen als een vlak van atomen waarbij, door het splijten, van ieder oppervlakte-atoom één of twee bindingen zijn doorgesneden. Deze doorgesneden bindingen noemen we *dangling bonds*, ofwel in een goede Nederlandse vertaling: bungelende bindingen. Deze bindingen zijn zeer reactief en daarom moet het kristaloppervlak in ultrahog vacuüm (UHV) worden bewaard. Doet men dit niet, dan reageert het oppervlak met de gasatmosfeer, vooral met zuurstof en water.

Schlier en Farnsworth gebruikten bij hun onderzoek een destijds nieuwe methode, lage-energie-elektronendiffractie (LEED). De werking tussen elektronen met een energie

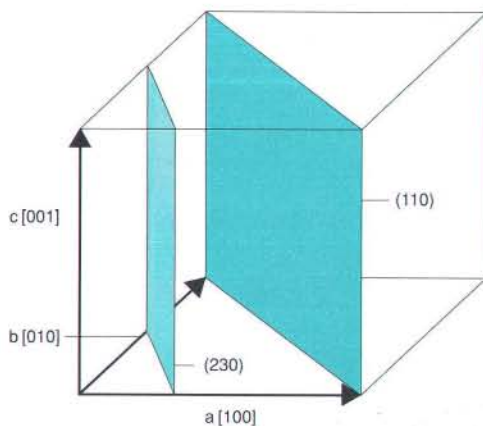


1

tussen de tien en honderd volt en het kristal is zo groot, dat de elektronen maar enkele atoomlagen diep in het kristal kunnen doordringen zonder energie te verliezen. Hierdoor is deze methode ongelooflijk oppervlak-specifiek. Het wetenschappelijk resultaat — 'kijken naar wat de natuur doet' — was dat voor het eerst werd waargenomen dat atomen aan het oppervlak een heel andere ordening hebben dan atomen in het binnenste van het kristal.

Kristallen en eenheidscellen

Atomen zijn in kristallen regelmatig gerangschikt in een zogenaamd *kristalrooster*. Door de grote regelmaat waarmee atomen in het kristalrooster gestapeld zijn, kan men in ieder kristal een eenheidscel onderscheiden waarin zich één



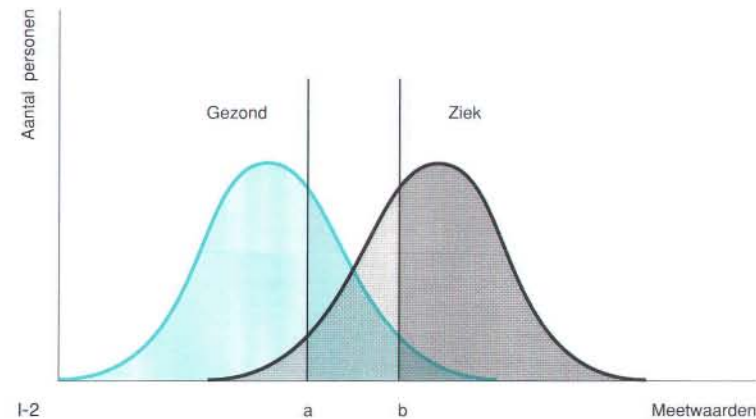
2

40

1. In een halfgeleider-laser zijn het de overgangen tussen de diverse kristallagen waar de elektrische processen zich afspelen waarbij een coherente lichtbundel ontstaat.

2. De diverse denkbare vlakken in een kristal geeft men aan met de Miller-indices. [100], [010] en [001] zijn in dit kubisch model de drie assen. Het vlak (230) loopt evenwijdig aan de z-as. Kristallen hebben een regelmatig kristalrooster met als kleinste eenheid de eenheidscel. Aan het oppervlak treden afwijkingen van de regelmatige kristalvorm op.

3. Ooit zag men de 'doorgesneden' bindingen van de atomen aan het oppervlak van een siliciumkristal als bungelende bindingen. Het kristaloppervlak was in dit model beperkt verschillend van het inwendige kristal (a). Dankzij moderne analysetechnieken kreeg men een nieuw beeld van het (2x1)-oppervlak (b). Na verhitting ontstaat weer een andere oppervlakte-structuur.



I-2

I-1. Het normaalwaarden-gebied ligt in deze Gauss-verdeling tussen 2,5 en 97,5 %

I-2. Beschouwt men personen met een meetwaarde > a als ziek, dan werkt men erg gevoelig; de meeste zieken noemt men terecht ziek. Specifiek is het niet; ook veel gezonde mensen worden dan ten onrechte ziek genoemd. Geldt waarde b als ziektegrens, dan werkt men erg ongevoelig (lang niet alle zieken worden als ziek herkend) maar wel specifiek; slechts weinig gezonde mensen beschouwt men als ziek.

We nemen de eigenschap lengte van jongens van twaalf jaar als voorbeeld. Wanneer is nu een gemeten lengte abnormaal? Hiervoor kijken artsen naar de gemiddelde lengte en naar de frequentieverdeling van lengten voor gezonde jongens van twaalf jaar. Van belang daarbij is het *normaal-waardengebied* of *referentiegebied*. Dit is het gebied van de normale verdeling rondom het gemiddelde, waarbinnen 95% van de meetwaarden vallen. De kans is klein (namelijk 5%) dat een twaalfjarige jongen een lengte heeft die buiten het referentiegebied ligt, bijvoorbeeld een lengte van 75 centimeter. Zo'n meetwaarde vat een arts op als een teken dat er iets aan de hand is.

Of een afwijkende uitslag inderdaad ziekte betekent hangt niet alleen af van het buiten het referentiegebied vallen van de uitslag. Van belang is ook de *specificiteit* van de bepaling. Specifiek in chemische zin betekent dat alleen die stof reageert, waarin onderzoekers geïnteresseerd zijn. In medische zin betekent het dat de meetuitslag samengaat met één of een gering aantal ziekten. Bij een aspecifieke bepaling bestaat er een reële kans dat een afwijkende uitslag niet op een bepaalde ziekte wijst.

Naar een definitieve diagnose

Zodra de arts, direct of na een vooronderzoek, een vermoeden heeft over de aard van de ziekte, zal hij proberen de diagnose te bevestigen en de ernst van de kwaal vast te stellen. Ook zal hij nagaan welke functies van het lichaam de ziekte aantast. Voor dit laatste is een scala van laboratorium-bepalingen voorhanden.

De tegenhanger van specificiteit is *sensitiviteit* of gevoeligheid. Dit is het vermogen daadwerkelijk te kunnen meten, wat een arts wil weten. Een specifieke bepaling die niet gevoelig genoeg is kan niet alle mensen met een betreffende ziekte opsporen. Een meting die een grote gevoeligheid heeft, is vaak weer minder specifiek; van de afwijkende uitslagen komen er in dat geval relatief veel niet met de betreffende ziekte overeen.

Eén en dezelfde meting geeft bij een goede meetmethode op een bepaald moment op een bepaalde plaats eenzelfde uitkomst als op een ander tijdstip, op een andere plaats; meetuitslagen behoren *reproduceerbaar* te zijn. Om dit te waarborgen vindt voortdurend controle plaats van alle meetmethoden in klinisch-chemische laboratoria over het hele land. In deze laboratoria meet men dagelijks controlemonsters die onderling worden uitgewisseld en met elkaar worden vergeleken. Een goed georganiseerd systeem van kwaliteitsbewaking zoals dat in Nederland en België bestaat, vormt de basis voor het vertrouwen dat de chemie in de hedendaagse geneeskunde geniet.

Er bestaan metingen die de aandoening van een orgaan of weefsel nauwkeuriger in kaart kunnen brengen dan het screenende onderzoek. Hierbij maakt de klinisch-chemicus gebruik van het feit dat weefsels en organen van elkaar verschillen. Dit betekent dat er enzymen en stofwisselingsproducten bestaan die specifiek zijn voor bepaalde weefsels of organen. Bilirubine bijvoorbeeld is een afbraakproduct

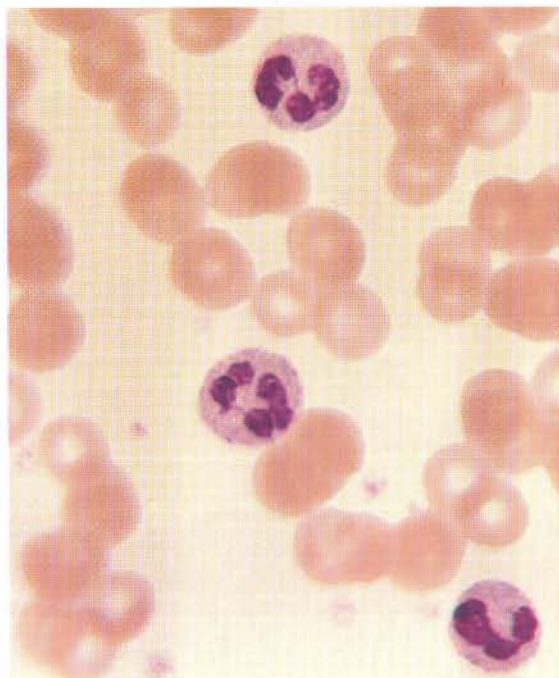
van het zuurstof-transporterende molecuul hemoglobine. Uitsluitend de lever verwerkt de bilirubine en voert deze verbinding af met de galzuren. Als er geen verhoogde afbraak van bloedcellen bestaat, duidt een toegenomen hoeveelheid bilirubine in het bloed op een defect in de lever.

Met stofwisselingsprodukten en enzymen kan men een mogelijke aantasting in kaart brengen, van bijna alle organen, weefsels en celtypen. Voor het vaststellen van een leverdefect zijn naast het bilirubine ook een aantal enzymen geschikt, die specifiek zijn voor de lever. Enzymen die in meerdere weefsels voorkomen en kleine moleculaire verschillen vertonen, zogenaamde iso-enzymen, zijn van elkaar te onderscheiden in klinisch-chemisch onderzoek. De arts krijgt dan specifieke informatie over het orgaan waarin hij geïnteresseerd is.

Hoewel de zojuist beschreven metingen een indruk geven over de mate van aantasting van een orgaan of weefsel, zeggen ze dikwijls niet hoeveel er van de orgaanfunctie over is. Bij een suikerpatiënt met te veel suiker in het bloed en in de urine, is het duidelijk dat de alvleesklier onvoldoende insuline maakt. Insuline is een hormoon dat de suikerstofwisseling regelt. In welke mate de alvleesklier nog werkt wordt pas zichtbaar als de patiënt in nuchtere toestand een bekende hoeveelheid suiker inneemt. Van belang is hoe snel de glucoseconcentratie in het bloed hierna stijgt en weer daalt. Deze test dient dus om de restfunctie van de alvleesklier te onderzoeken; onder standaardomstandigheden (de patiënt is nuchter) krijgt iemand een stimulus (de bekende hoeveelheid suiker) waarna een serie metingen volgt.

Ook hormonen zelf kunnen een stimulus vormen, doordat zij via de bloedstroom bepaalde organen tot werkzaamheid kunnen aanzetten. Bij het onderzoek naar de juiste werking van hormonen kijken onderzoekers hoe specifieke organen of weefsels reageren op toediening van een bepaald hormoon.

Als de testwaarnemingen in een bekend ziektebeeld passen kan de arts een diagnose stellen. Maar de oorzaak van de aandoening staat daarmee niet vast, evenmin als wat er op moleculair niveau misgaat. Het vergaren van deze kennis streeft de arts meestal ook niet na, maar in een aantal gevallen is het juist van groot belang. Zo levert het aantonen van een vergif bij een patiënt een regelrechte verklaring voor



9

de oorzaak van vergiftigingsverschijnselen. Ook een aantoonbaar enzymdefect bij een aangeboren ziekte brengt ons dicht bij de oorzaak van de aandoening.

Een verandering in een gen kan een ziekte veroorzaken. Bij zo'n drieduizend erfelijke aandoeningen is dit aangetoond. Van meer dan driehonderd van deze ziekten is het biochemische defect aangetoond — meestal de afwezigheid van een enzym of een foutief gevormd enzym. Het bekendst zijn de hemofilieën ofwel bloederziekten, waarbij het gemis van de functie van een van de stollingsfactoren (enzymen die de bloedstolling verzorgen) resulteert in een vertraagde bloedstolling. In het laboratorium tonen analisten dit defect gemakkelijk aan. Zo missen hemofilie-A-patiënten stollingsfactor VIII en ontbreekt bij hemofilie-B-patiënten factor IX. In principe zijn we in staat bij erfelijke aandoeningen het gebrekkig enzym of de afwezigheid van een enzym aan te tonen, zoals bleek in geval van lysosomale enzymen. We kunnen natuurlijk ook proberen direct de verandering in het DNA aan te tonen. Dit behoort de laatste jaren meer en meer tot de mogelijkheden.

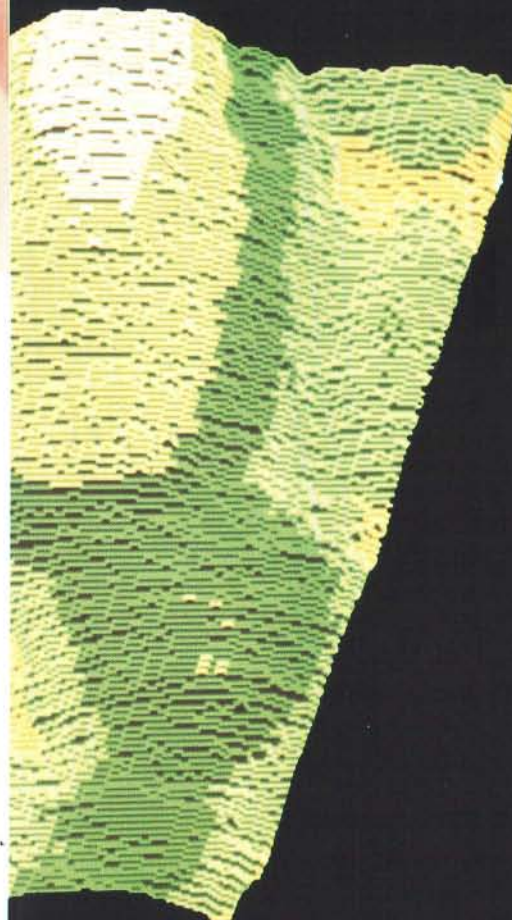
ERDIMENSIE

TENSCHAP EN TECHNIEK

F. Meijer

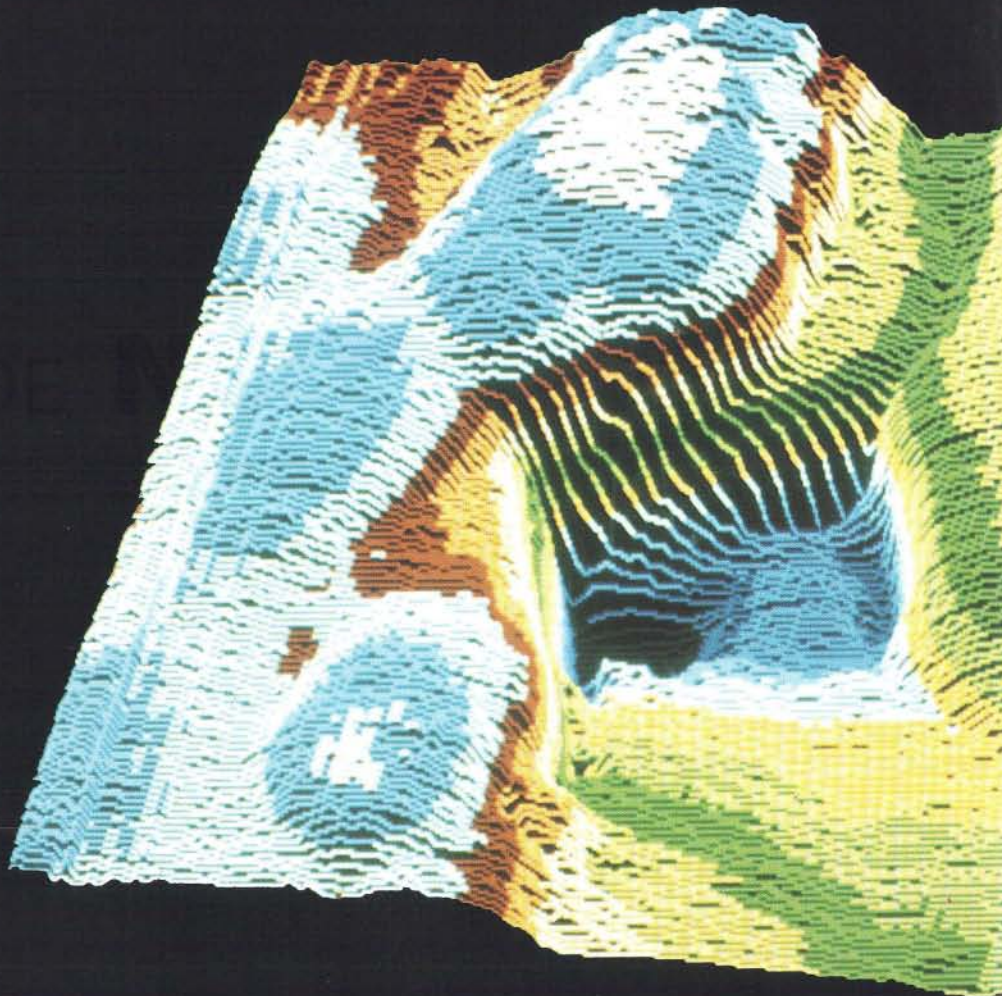
*Philips Research Laboratories
Eindhoven*

Dertig jaar oppervlakte-onderzoek laat zowel een enorme wetenschappelijke als technische ontwikkeling zien. Vastestoffysici verkregen door vele experimenten inzicht in atomaire lagen, vanaf de eerste elektronendiffractiemetingen tot de huidige scanning-tunneling-microscopie. Dankzij de nieuwe theoretische inzichten en steeds grotere computers konden zij eigenschappen van deze lagen begrijpen en soms voorspellen. Deze wetenschappelijke resultaten leidden tot technieken die nu worden toegepast bij halfgeleiderprodukten zoals lasers en transistoren. Ook in andere materialen geeft de nanometerdimensie nieuwe eigenschappen die zullen leiden tot nieuwe produkten, bijvoorbeeld magnetooptische platen voor gegevensopslag. Dankzij de snelle ontwikkeling van de techniek kan men materialen maken waarin zich weer nieuwe verschijnselen afspelen en zijn meetmethoden in geperfectioneerde vorm commercieel verkrijgbaar. Na dertig jaar bloeit het onderzoek aan oppervlakken en dunne lagen nog steeds, dankzij de wisselwerking tussen wetenschap en techniek.



DE NANOMETE

GRENSVLAK TUSSEN WE



Met de scanning-tunneling-microscop kan een beeld van het oppervlak van een kristal worden verkregen, waarbij de computer de

verschillende hoogten van het oppervlak vertaalt in diverse kleuren. In dit goudoppervlak hebben wetenschappers de naald van een

scanning-tunneling-microscop gebruikt als een etsnaald en een kuil met een afmeting van twintig bij twintig nanometer getekend.

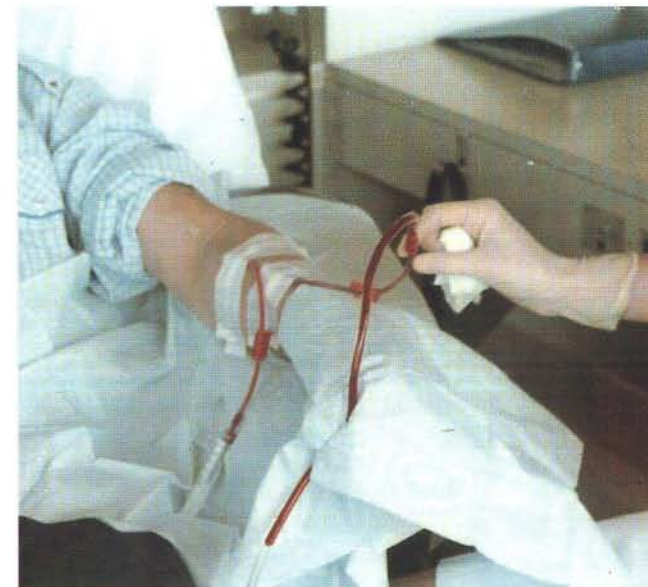


9 en 10. Bloedonderzoek kan van groot belang zijn voor het stellen van een diagnose of het volgen van een ziekte. In normaal beenmerg is een scala van witte en rode bloedcellen aanwezig (9). Bij een acute leukemie krijgt een bepaald type bloedcel de overhand (10).

Het ziekteverloop

Gaat de patiënt vooruit? Dit kunnen we nagaan met de koortsthermometer, maar die geeft weinig specifieke informatie. Voor het nauwkeurig volgen van een mogelijke vooruitgang dienen andere methoden, waaronder klinisch-chemische testen. Soms zijn de onderzoeken voor de diagnosestelling dezelfde als de testen voor het volgen van het ziekteverloop. Dit geldt voor het bloedcel- en beenmergonderzoek bij leukemie, een ziekte waarbij de bloedaanmaak gestoord is. Na een celkleuring kunnen de aanwezige cellen onder een microscoop geteld en geïdentificeerd worden. Een toe- of afname van het aantal kwaadaardige cellen toont het verloop van de leukemie.

Tijdens de behandeling komen vaak nieuwe onderzoeken om de hoek kijken. Bij patiënten met bloedarmoede bijvoorbeeld tellen we het aantal jonge bloedcellen, de zogenaamde reticulocyten, om te kijken of de bloedaanmaak zich herstelt. Illustratief is ook het volgen van het ziekteverloop bij multipole myeloom, een



11

11 en 12. Tijdens een hemodialyse zuivert de kunstnier het bloed buiten het lichaam. Daarbij meet het instrument de zuur-

graad en de ionenconcentratie. In het laboratorium controleert men regelmatig het bloed van de nierdialysepatiënt op natrium-,



12

kalium-, kreatinine- en hemoglobinegehalte. Soms meet men eveneens de hoeveelheid aluminium-ionen in het bloed.

vorm van leukemie waarbij kwaadaardige cellen na verloop van tijd de botten aantasten. Een maat voor de botaantasting vormen hier de hoeveelheid calcium en de hoeveelheid van het enzym alkalisch-fosfatase. Beide komen vrij uit botweefsel.

Controle is niet alleen bij herstel of bij het voortschrijden van een ziekte nodig. Soms gaat het om het in de gaten houden van een toestand die lange tijd stabiel is. Zo meten artsen bij suikerpatiënten, om na te gaan of ze de juiste hoeveelheid insuline gebruiken, de concentratie HbA1-C. HbA1-C is een niet-functionele vorm van hemoglobine waaraan een suikerrest vastzit. HbA1-C ontstaat spontaan in de rode bloedcellen; hoe hoger de bloed-glucose-concentratie, des te meer HbA1-C wordt gevormd. Te weinig of onregelmatig insulinegebruik doet de hoeveelheid glucose in het bloed toenemen en daarmee ook het HbA1-C-gehalte. Omdat het HbA1-C vrij traag ontstaat en langzaam wordt afgebroken, is dit gehalte een goede maat voor de hoeveelheid glucose in het bloed over langere tijd. Dit in tegenstelling tot

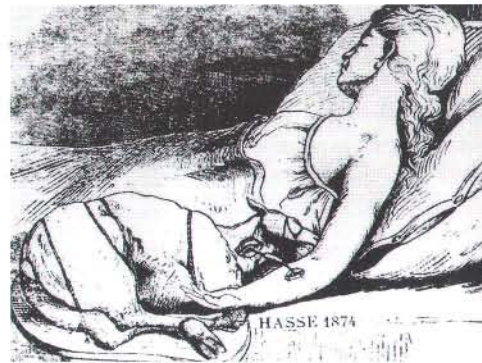
13. De interpretatie van een screeningstest is niet altijd eenvoudig. Deze screening op aminozuren in de urine laat dit zien. Medicijngebruik en voeding beïnvloeden het normale patroon van aminozuren. Het is bovendien moeilijk een stofwisselingsziekte te herkennen, omdat deze ziekten zeldzaam zijn.

14. Voor een geslaagde bloedtransfusie is het vereist dat de ontvanger de bloedcellen van de donor niet afstoot. Dat dit soortge-

15. Ver van het bed van een zieke verkrijgt een analist

informatie over de gesteldheid van de patiënt.

bonden is heeft men jammerlijk moeten vaststellen. Het toedienen van dierlijk bloed is voor zowel mens als dier dodelijk.



14

het glucose-gehalte zelf dat, afhankelijk van de voeding en de beschikbare insuline, vrij sterk fluctueert.

Onmisbare steun

Zodra een arts weet aan welke kwaal zijn patiënt lijdt, ontstaat er duidelijkheid over het mogelijke ziekteverloop en de nodige behandeling. Daarna zal een arts vaak vragen om ondersteunende bepalingen, laboratoriumonderzoek dat niet direct verband houdt met de ziekte. Zo zijn voor patiënten die aan een infuus of aan beademingsapparatuur liggen bepaalde bloedmetingen van groot belang. De hoeveelheden natrium en kalium in het bloed en de concentratie van zuurstof en koolstofdioxide, zijn belangrijke controlemiddelen voor het verloop van de behandeling. Tijdens een hemodialyse, een zuivering van het bloed buiten het lichaam om, wordt soms de aluminiumconcentratie in het bloed gemeten. Aluminium, dat bij hoge concentraties giftig is, wordt bij dialyse als fosfaatverlagend middel toegediend.

Voor bepaalde ingrepen zijn laboratoriumgegevens absoluut noodzakelijk. Een chirurgi-

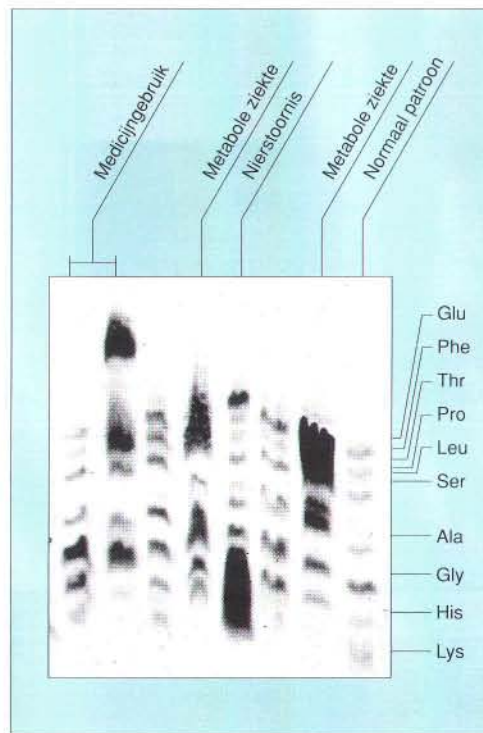


15

sche ingreep zou kunnen uitmonden in een levensbedreigende bloeding als de bloedstolling van de patiënt niet in orde is. Onderzoek van de bloedstolling vóór een operatie kan zo'n ongewenste situatie voorkomen. Zo kan onderzoek dat niet direct verband houdt met de ziekte, van levensbelang zijn.

Tegen het eind van een ziekte gaat de patiënt, hopelijk hersteld, weer voort. Tijdens het ziek zijn heeft hij niet in de gaten gehad hoeveel mensen er voor hem werkten; hoogstens merkte de patiënt dat hij voor de zoveelste keer geprikt moest worden voor een onderzoek. Toch vormt het laboratoriumwerk achter de schermen de basis voor vele beslissingen; beslissingen over wat een patiënt mankeert en wat de beste therapie zal zijn.

Met alleen kijken, voelen en luisteren kan een arts het menselijk lichaam nauwelijks doorgronden. De voortgang van wetenschap en techniek heeft vele onderzoeksmethoden mogelijk gemaakt. Laboratoriumbepalingen zijn een onmisbaar instrument geworden voor vele terreinen van de geneeskunde. De klinische chemie draagt hiermee bij aan de bescherming van een kostbaar bezit - onze gezondheid.

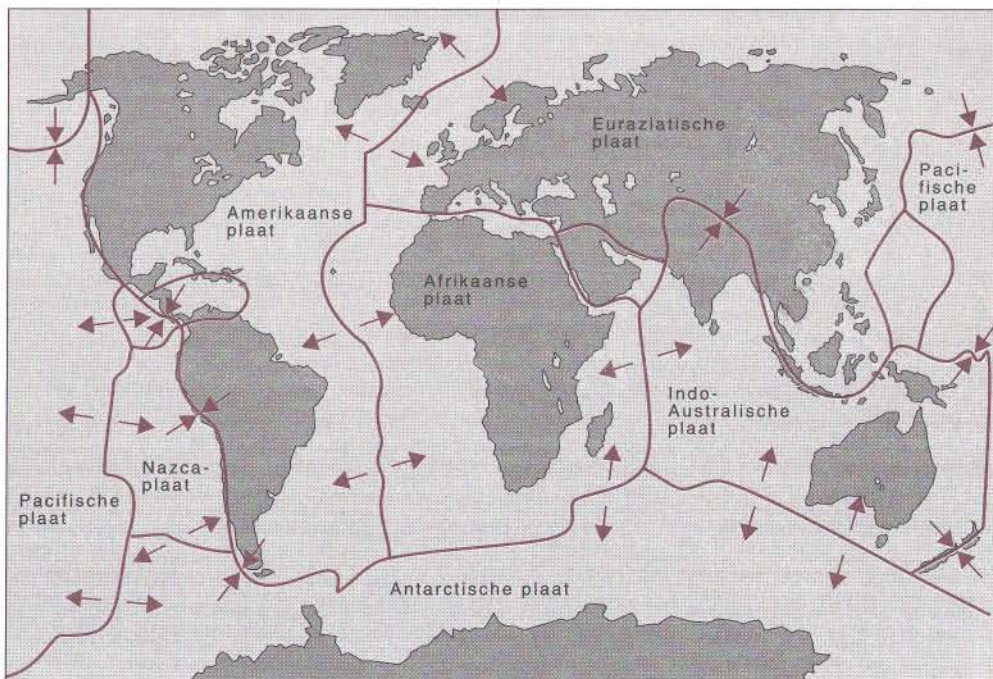


13

36

Bronvermelding illustraties

BCO Centrum voor onderzoek, Breda: pag. 26-27.
Centraal laboratorium van de bloedtransfusiedienst, Amsterdam: 1, 9 en 10.
MSI Europe, Tilburg: 2.
TNO Werkgroep Tuberculine Onderzoek, Den Haag: 5, 6 en 7.
Boehringer Mannheim BV, Almere: 8.
Nierstichting, Bussum: 11 en 12.
Dr R. Wevers, Sint Radboudziekenhuis Nijmegen: 13.
Collectie prof dr de Moulin, Katholieke Universiteit Nijmegen: 14.
Jan van Teefelen, Nijmegen: 15.
De overige afbeeldingen zijn afkomstig van de auteurs.



telijk gesmolten asthenosfeer bewegen. Ze botsen tegen elkaar, bewegen van elkaar af en glijden langs elkaar heen, met op hun rug de oceanen en de continenten (zie het kader). De sleutel tot de theorie van de platentektoniek is dat het aardoppervlak in een evenwichtstoestand verkeert. Platen ontstaan langs de oceanische ruggen, waar warmte en materiaal uit de asthenosfeer omhoog komen en nieuwe korst vormen. Dit wordt in evenwicht gehouden door het onderschuiven van platen of, zoals het tegenwoordig wordt genoemd, **subductie**, waarbij platen op een andere plaats worden vernietigd en oude korst terugkeert in de asthenosfeer. Je zou kunnen zeggen dat de nieuwe plaat door een opwaartse stroming naar het oppervlak wordt gebracht, en de oude plaat door een neergaande stroming weer terug in

de smeltkroes van de mantel wordt geduwd. Met behulp van lasers en satellieten verzamelden onderzoekers gegevens die aantonen dat de platen bewegen met snelheden tussen de anderhalf en zeven centimeter per jaar (dat is ongeveer de snelheid waarmee nagels groeien). De platen aan weerszijden van de Midden-Atlantische Rug bijvoorbeeld, bewegen met een snelheid van twee tot vier centimeter per jaar uit elkaar. De theorie van de platentektoniek levert een wereldwijd raamwerk, dat veel van de structurele en geofysische fenomenen aan het aardoppervlak verklaart, variërend van gebergtevorming en aardbevingen (zie het kader) tot continentverschuivingen. Maar, gemeten naar de grootte van onze planeet, is onze kennis van de buitenlaag buiten alle proporties.

De ontdekking van de zeebodemspreiding leidde tot de theorie dat de lithosfeer uit een aantal platen is opgebouwd.

Dit artikel werd voor ons vertaald door drs C. de Jong en geautoriseerd door prof dr H.N.A. Priem, Artis Geologisch Museum, Amsterdam.

Smith DG, red. Cambridge encyclopedie van de aardwetenschappen. Maastricht/Bussum: Natuur & Techniek/Romen, 1983

Brown B, Morgan L. Planeet aarde - Het verhaal van de 4,6 miljard jaren waarin onze wereld werd gevormd. 's-Gravenhage: SDU Uitgeverij, 1989.

Menard HW. Eilanden - Oceanen in beweging. Maastricht: Wetenschappelijke Bibliotheek, Natuur & Techniek, 1990.

KIJK OP WETENSCHAP verschijnt zes maal per jaar, onder redactie van Natuur & Techniek, in samenwerking met New Scientist. Van dit katern zijn overdrukken beschikbaar voor / 2,50 of 50 F per exemplaar (excl. verzendkosten), te bestellen bij Natuur & Techniek, Postbus 415, 6200 AK Maastricht (Nederland); telefoon 0(0-31)43-254044. Voor het maken van kopieën is toestemming vereist van de Stichting Reprorecht (Postbus 882, 1180 AV Amstelveen, Tel.: 0(0-31)20-5407496).

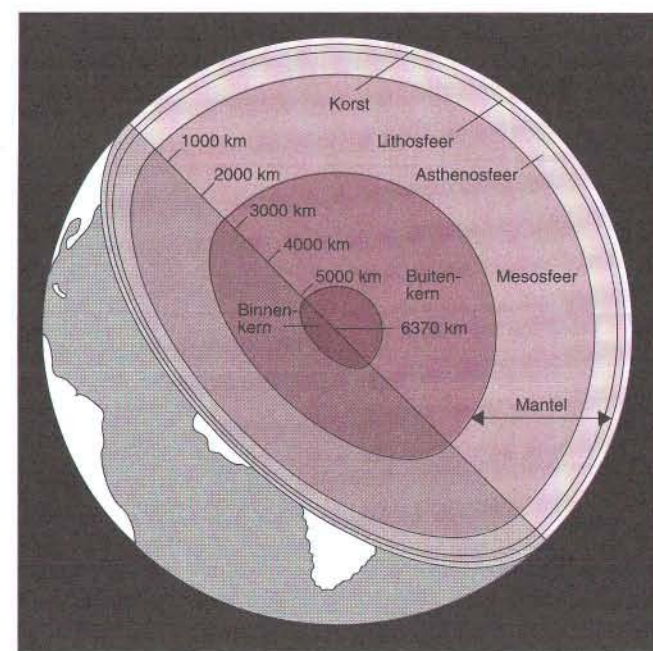
DE STRUCTUUR VAN DE AARDE

Geologen hebben het binnenste van onze planeet grondig onderzocht en aangetoond dat zij bestaat uit een aantal schillen. Toen ze probeerden een beeld van het inwendige te krijgen, ontdekten ze dat de buitenste schil, de korst waarop wij leven, voortdurend beweegt.

Richard Fifield

Knijp jezelf en je weet zeker dat vlees steviger is dan lucht en water, maar minder stevig dan de rotsen waarop wij lopen. De dichtheid van water is één gram per kubieke centimeter (g cm^{-3}), tegen een gemiddelde dichtheid van de aarde van $5,5 \text{ g cm}^{-3}$. De dichtheid van ons lichaam, inclusief de botten, ligt dichterbij 1 g cm^{-3} dan bij $5,5 \text{ g cm}^{-3}$. Met behulp van het begrip dichtheid kunnen we meer te weten komen over de opbouw van de aarde. We kunnen natuurlijk niet direct in het inwendige van onze planeet kijken. Licht dringt niet door steen heen. Druk- of schokgolven van aardbevingen doen dat echter wel.

Als deze golven zich voortplanten door gesteenten, veranderen zij van richting en snelheid zodra het gesteente verandert. Dankzij die eigenschap kunnen geologen diep doordringen in het inwendige van de aarde, door te meten hoe lang het duurt voordat de schokgolven van een aardbeving verschillende punten bereiken die over de aarde verspreid liggen. Op deze wijze is aan het licht gekomen dat de aarde is opgebouwd uit **schillen**, zo ongeveer als een ui. Aan de buitenkant zit een dunne **korst**; de



De aarde is opgebouwd uit schillen. De korst waarop wij leven, vertegenwoordigt slechts

één procent van het volume en maakt deel uit van de starre buitenschil, de lithosfeer.

dikte ervan is niet meer dan die van een postzegel op een voetbal. Daaronder bevindt zich de **mantel**, die meer dan tachtig procent van het volume van de aarde omvat. Nog dieper komen we aan een zeer dichte en zeer hete **kern**. De laatste eeuw hebben geologen talloze stukjes informatie

bijeen gebracht, waardoor een steeds gedetailleerder beeld is verkregen van het inwendige van de aarde. Veel van deze informatie vindt zijn oorsprong in het onderzoek van aardbevingen. Maar geologen hebben voor het verkrijgen van informatie hun aandacht ook gericht op het magnetisch veld

van de aarde, op meteorieten en op ketens van eilanden en vulkanen. Al deze inspanningen brachten iets meer aan het licht over het inwendige van de aarde.

Aardbevingsgolven Een planetaire ui

Na een aardbeving verspreiden druk- of schokgolven zich in alle richtingen. Net als lichtgolven die door glas gaan, worden de schokgolven **weerkaatst of gebroken** zodra ze bij een gesteente met andere dichtheid komen. Wanneer de dichtheid groter is, neemt de snelheid toe; als het gesteente minder dicht is, neemt de snelheid van de golven af. Door de baan en de snelheid van de aardbevingsgolven door de aarde te bepalen, kunnen geologen de dichtheid en dikte vaststellen van gesteenten die duizenden kilometers onder onze voeten liggen.

Aan het eind van de vorige eeuw ontwikkelden geofysici meetinstrumenten waarmee aardbevingsgolven kunnen worden geregistreerd – **seismografen**. Daarmee stelden zij al gauw vast dat aardbevingen twee hoofdtypen van golven in het inwendige van de aarde opwekken. De eerste, aangeduid als **primaire of P-golven**, planten zich voort als opeenvolgende verdichtingen en verdunningen van het medium waardoor zij zich voortplanten. Zulke **longitudinale** golven kunnen door gesteenten, gassen en vloeistoffen lopen. De P-golf wordt gevolgd door de **secundaire of schuifgolf**, aangeduid als **S-golf**, met de trilling loodrecht op de voortplantingsrichting. Omdat vloeistoffen

stoffen en gassen te veel 'meegeven' om deze **transversale** trilling door te geven, kan een S-golf zich alleen door een vaste stof voortplanten.

Toen Andrija Mohorovičić, een Joegoslavisch geofysicus, in 1909 de registraties van een aardbeving in Kroatië analyseerde, nam hij vier soorten aardbevingspulsen waar: twee drukgolven en twee schuifgolven. Seismografen die dichtbij de plaats van de aardbeving waren opgesteld, hadden S- en P-golven geregistreerd die zich langzaam voortplantten. Op grotere afstand van de aardbeving doofden deze signalen snel uit; zij werden vervangen door snellere S- en P-golven.

Mohorovičić interpreteerde de langzame golven als golven die zich direct vanuit het brandpunt van de aardbeving door de bovenste laag van de korst, naar het seismografisch station hadden voortgeplant. De snelle golven moesten zich echter door een onderliggende laag met grotere dichtheid heb-

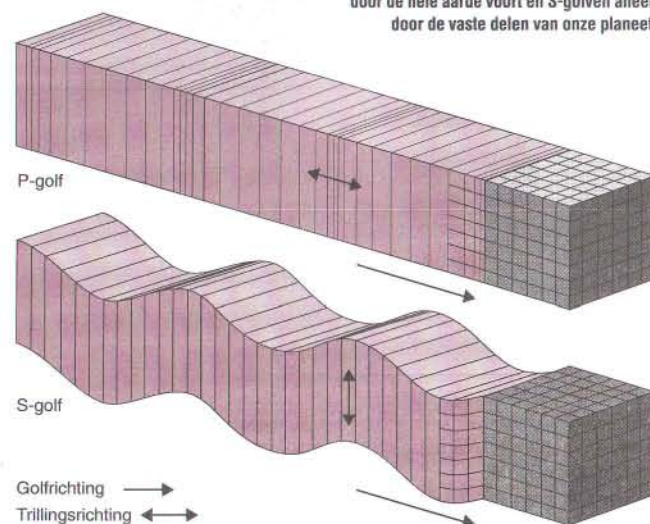
ben voortgeplant, waardoor ze werden afgebogen en waardoor hun snelheid toenam.

Hij trok de conclusie dat een verandering in dichtheid van 2,9 naar 3,3 g cm⁻³ de grens van de aardkorst met de aardmantel markeert. Als erkenning voor zijn ontdekking noemen geologen deze grens de **Mohorovičić-discontinuïteit**, of simpelweg de **Moho**.

Toen seismologen de beschikking kregen over steeds meer seismografische gegevens, ontdekten zij een 'schaduwgordel' waarbinnen geen trillingen werden geregistreerd. Deze schaduwgordel bevindt zich tussen 105° en 142° van de bron van de aardbeving. Voorbij 142° verschenen de P-golven weer op de seismogrammen.

De enige passende verklaring was dat de trillingen van een vaste stof naar een vloeistof waren gegaan. Dit zou de S-golven tegenhouden en de P-golven afbuigen en vertragen (zie de figuur op de volgende pagina). De seismologen concludeerden dat op een

Bij een aardbeving planten P-golven zich door de hele aarde voort en S-golven alleen door de vaste delen van onze planeet.



DE DYNAMIEK VAN DE PLATENTEKTONIEK

De theorie van de platentektoniek veronderstelt dat iedere plaat zich als een starre eenheid gedraagt, die alleen langs de randen wordt vervormd. Deze randen of grenzen kunnen van elkaar af, naar elkaar toe en langs elkaar heen bewegen. In het midden van een plaat verandert er zeer weinig. In feite markeren enkele van de meest dynamische verschijnselen van de aarde, zoals vulkanen en aardbevingen, de grenzen van de grote platen.

Langs **midden-oceanische ruggen** doet magma dat vanuit de asthenosfeer omhoog komt, twee uit elkaar bewegende (**divergerende**) platen aangroeien. De ruggen zijn een soort langgestrekte, doorlopende vulkanen. Over hun hele lengte treden veel ondiepe aardbevingen op (minder dan 50 km onder het oppervlak). In zones waar de platen langs elkaar bewegen, glijden de

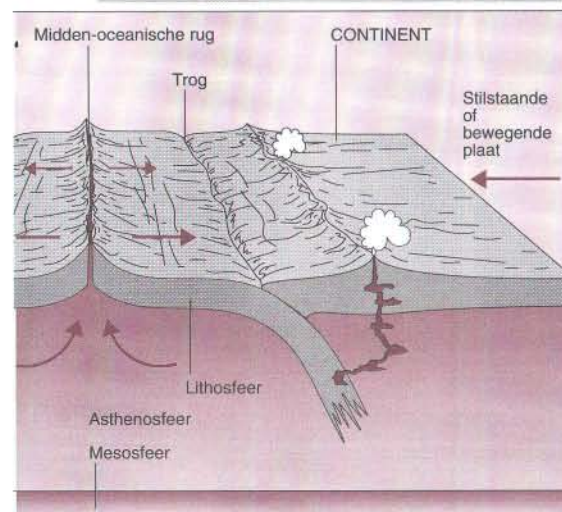
randen langs elkaar. Bij deze breuken wordt géén plaatmateriaal toegevoegd of vernietigd. Op zulke plaatsen komen vaak krachtige, ondiepe aardbevingen voor. De San Andreas-breuk in Californië is een klassiek voorbeeld van langs elkaar schuivende platen.

Waar twee platen **convergeren**, tegen elkaar aanbotsen, ontstaat een **trog** en wordt één plaat naar beneden gebogen, tot in de asthenosfeer. Bij deze grenzen ontstaan bergen en eilandenreeksen. Aardbevingen vinden er plaats tot op een diepte van zevenhonderd kilometer (in feite langs de gehele wegduikende plaat). Kenmerkende voorbeelden van wat er langs convergerende plaatgrenzen gebeurt, zijn het Andesgebergte en de Aleoeten, een langgestrekte reeks eilanden bij Alaska.

Grote bergketens zijn vaak het resultaat van een botsing tussen een oceanische plaat en een dikke continentale plaat. De rand van het continent gedraagt zich als de scherpe kant van een schaar, die enorme hoeveelheden materiaal van de wegduikende plaat afschaaft. Deze afgeschaafde massa's vormen langzaam maar zeker bergketens. De wegduikende oceanische plaat wordt grotendeels weer in de asthenosfeer opgenomen. Een klein gedeelte van het lichte materiaal stijgt tijdens het smelten op en doet de groeiende bergketen oprijzen door er een 'wortel' onder te vormen. Wanneer dit magma zich een weg baant naar het aardoppervlak, ontstaat daar een rij vulkanen.

Waar een relatief dunne continentale plaat tegen een oceanische plaat botst, ontstaat een diepe trog, zoals hiervoor beschreven. Doordat de oceanische plaat gedeeltelijk smelt, ontstaat er een boogvormige keten van vulkanische eilanden.

Tenslotte kunnen ook twee continentale platen met elkaar in botsing komen. De continentale gesteenten zijn relatief licht en hebben te veel drijfvermogen om in de asthenosfeer te worden geperst. Het gevolg is een reusachtige, samengeperste zone, met gesteenten en andere materialen die geplooid, overschoven en aaneengesmeed zijn. Indrukwekkende bergketens zoals de Himalaya zijn zo ontstaan.

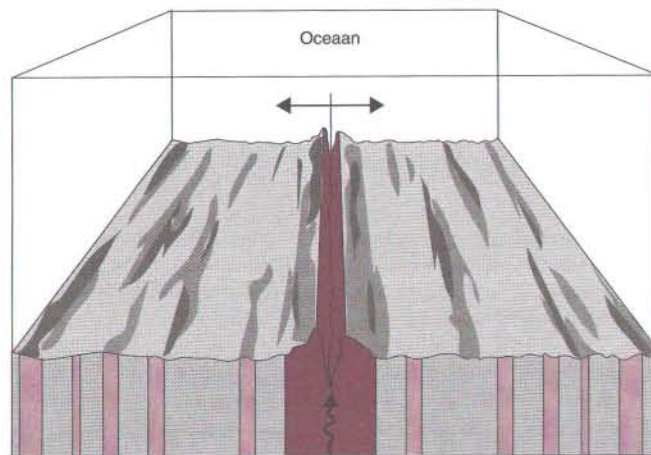


Nieuwe platen worden bij oceanische ruggen gevormd en bewegen van elkaar af (divergeren). Waar twee platen naar elkaar toe bewegen (convergeren), duikt de ene steil onder de ander, waardoor oude plaat terugkeert naar de asthenosfeer.

In 1967 voegden Amerikaanse geofysici er een andere theorie aan toe – die van de 'onderschuiving', waarbij één stuk aardkorst langs diepteetrogen onder een ander duikt.

Uit zulke ideeën ontwikkelden Fransen, Britten en Amerikanen een allesomvattende theorie over de korst van de aarde, die spoedig de naam platentektoniek kreeg (het woord 'tek-

toniek' komt van het Griekse woord voor 'bouwmeester'). Het idee is dat de buitenste schil van de aarde, de lithosfeer, uit zes of meer grote platen bestaat die over de gedeel-



soorten planten en dieren. Bij stukjes en beetjes druppelden aanwijzingen binnen die erop leken te wijzen dat het landoppervlak van de aarde eens één geweldig groot continent was, dat opbrak en langzaam in aparte stukken uiteen dreef. Het probleem was dat niemand kon verklaren hoe dit had plaatsgevonden.

Toen, in 1928, opperde Arthur Holmes, hoogleraar in de geologie aan de universiteit van Durham, het idee dat er **convectiestromen** in de bovenmantel zouden zijn. Later breidde een Amerikaan, Harry Hess, deze theorie uit met de hypothese van de **zeebodem-spreiding**. Hij opperde dat er door de convectie gesmolten gesteente, dat bekend staat als **magma**, van binnenuit de aarde omhoog wordt gestuwd en de korst erboven openscheurt. Tijdens het stollen vormt het magma een strook basaltisch gesteente, die zich geleidelijk naar weerszijden verplaatst wanneer er meer magma uit de scheur opwelt. Dit proces vindt plaats in de grote bergruggen die door alle wereldzeeën lopen.

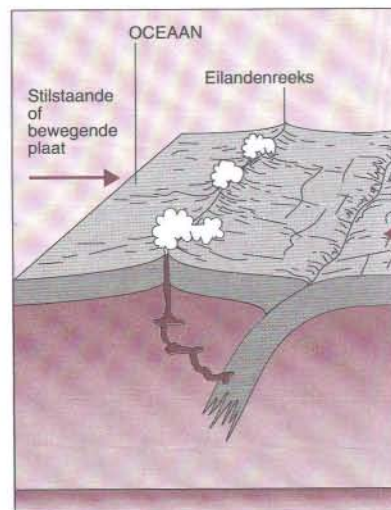
Veel wetenschapsmensen, vooral geologen, wilden het

idee van de zeebodem-spreiding niet accepteren, totdat ze in de jaren zestig met de gegevens van het magnetisch onderzoek werden geconfronteerd. Geleerden op onderzoeksschepen hadden het magnetisme gemeten van gesteenten aan weerszijden van de oceanische bergketens, zoals de Midden-Atlantische Rug. Zij vonden dat de gesteenten van de oceaانبodem in een reeks banden evenwijdig aan de rug afwisselend waren gemagnetiseerd in tegengestelde richtingen. Bovendien was het patroon van de gemagnetiseerde banden aan weerskanten van de rug gelijk.

De onderzoekers verklaarden dit door te stellen dat basaltisch magma dat uit de aardmantel opwelt en afkoelt op de oceaانبodem, wordt gemagnetiseerd in de richting van het dan heersende magnetisch veld. Bij voortdurende erupties breekt het magma door de eerstgevormde strook hard geworden basalt heen en splitst deze in tweeën. Als het magnetisch veld omkeert, zal deze nieuwe strook basalt worden gemagnetiseerd in een richting tegengesteld aan die van de vorige band.

Doordat er continu magma uit een midden-oceanische rug opwelt in een wisselend magnetisch veld, zijn de gesteenten aan weerskanten van een rug afwisselend in tegengestelde richtingen gemagnetiseerd.

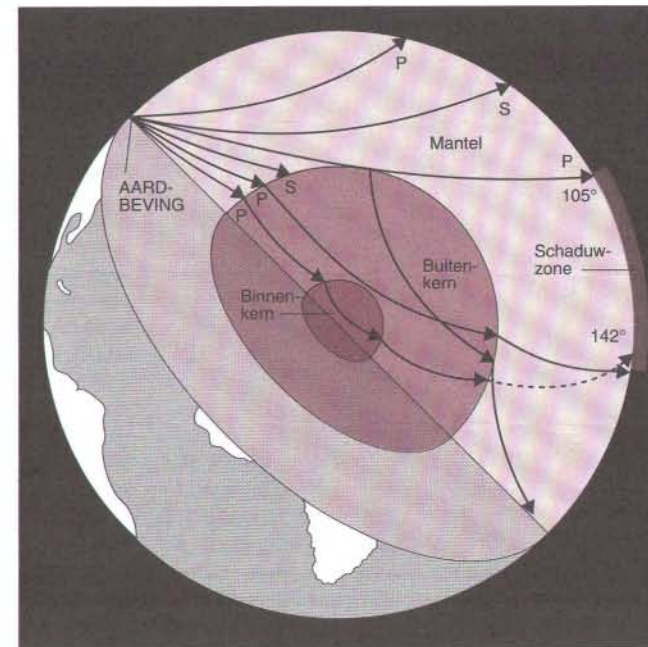
Dit, te zamen met de toenemende ouderdom van de gesteenten bij toenemende afstand tot de oceanische rugen, ondersteunde de theorie van de zeebodemspreiding. Die verklaart hoe continenten die ooit één geheel vormden, door voortdurende toevoeging van materiaal aan de oceaانبodem konden worden gescheiden door uitgestrekte wereldzeeën.



Platentektoniek

Een wereldwijde transportband

In 1965 verenigde J. Tuzo Wilson, een Canadees, de continentverschuiving en de zeebodemspreiding in één wereldomvattende theorie van bewegende zones en starre platen.



diepte van 2900 km de dichtheid verandert van 5,5 naar 10 g cm⁻³. Zij bestempelden dit als de grens tussen de mantel en de kern.

Later ontdekten zij toch golven in de schaduwgordel, zij het zeer vage. In het midden van de jaren dertig stelde een Deense seismologe, Inge Lehmann, voor dat een volgende verandering in de dichtheid op een diepte van ongeveer 2250 km in de kern zou plaats vinden. Deze verandering van dichtheid zou de P-golven versnellen en enkele ervan zodanig afbuigen dat ze in de schaduwgordel terecht kwamen. Zij concludeerde dat de aarde een vaste binnenkern bezit met een zeer hoge dichtheid. Anderen bevestigden haar conclusies en nu wordt geschat dat de dichtheid bij deze grens verandert van 12,3 naar 13,3 g cm⁻³, met in het centrum van de aarde een dichtheid van 13,6 g cm⁻³.

Hitte versus druk

Vaste of gesmolten rots

Tegenwoordig onderzoeken geologen het inwendige van de aarde steeds vaker met kunstmatige aardbevingsgolven. Zij gebruiken een echolood, kleine explosies of andere systemen die trillingen opwekken. Zo kunnen ze een aardbeving 'aan' of 'uit' zetten waar en wanneer ze maar willen. Het algemene beeld dat we nu van de aarde hebben is dat van een aantal concentrische schillen, die naar het centrum toe een steeds grotere dichtheid hebben. Twee elkaar tegenwerkende factoren bepalen de stijfheid en daarmee de dichtheid van de schillen. De eerste is **temperatuur**, die gesteenten zacht maakt of zelfs doet smelten. Door de

Seismografen registreren in de 'schaduw-zone' van een aardbeving weinig of geen trillingen. Zo ontdekte men de aardkern.

warmte die wordt geproduceerd bij het verval van radioactieve elementen in gesteenten, is het binnenste van de aarde witheet. In het centrum heerst een temperatuur van misschien wel 3000°C, tegen 375°C op de grens van korst en mantel.

De tweede factor is **druk**, die gesteenten juist vaster maakt. Hoe dieper je gaat, des te groter is het gewicht van de bovenliggende gesteenten en des te hoger is de druk.

Als gevolg van beide factoren zijn de gesteenten aan het koude oppervlak hard en broos. Geologen noemen dit deel van de aarde de **lithosfeer** (van het Griekse *lithos*, steen). Deze laag, die de korst en het bovenste deel van de mantel omvat, is ongeveer 70 km dik.

Aan de onderkant van deze laag worden aardbevingsgolven afgeremd, wat op een verandering van dichtheid wijst. Daar begint de **asthenosfeer** (van het Griekse woord *asthenos* wat 'gebrek aan kracht' betekent, zoiets als 'plastisch'). Hier kan de door radioactiviteit geproduceerde warmte niet zo makkelijk worden afgevoerd, waardoor de gesteenten smelten en zelfs kunnen gaan vloeien. De toefee-achtige asthenosfeer is bijna 200 km dik.

Onder de asthenosfeer neemt de snelheid van de aardbevingsgolven snel toe, daarna volgt over ongeveer 2500 km een langzame toename van de snelheid. Dit is de **mesosfeer** (*mesos* is Grieks voor midden). Ondanks de warmte is de druk hier zo groot, dat gesteente en andere materialen er stijver zijn

dan in de asthenosfeer en alleen heel langzaam kunnen 'kruipen'.

Aangekomen bij de kern doven de S-golven uit. Aan de buitenzijde van de kern is de temperatuur hoog genoeg om de immense druk van de gesteenten erboven op de heffen, zodat de kern tot een diepte van 2200 km vloeibaar is. Naar binnen toe wordt de druk zo groot dat het centrum van de aarde, met een straal van 1270 km, vast is.

De samenstelling

Van binnen en van buiten

Iets te weten komen over de fysische toestand van het materiaal in de schillen van de aarde is één ding; het achterhalen van de chemische samenstelling is een heel ander probleem. We kunnen natuurlijk gaten in de aardkorst boren en gesteentemonsters verzamelen, maar nog nooit heeft iemand de mantel bereikt. Het diepste boorgat ter wereld, op het Kola-schiereiland in de Sovjet-Unie, dringt slechts door tot een diepte van 12 km – ongeveer tot halverwege de korst of slechts 0,2% van de afstand tot het centrum van de aarde.

Wat weten we door directe waarneming eigenlijk over de korst? In continentale gebieden zien we dat silicium en aluminium veel voorkomende elementen zijn. Gebonden aan zuurstof vormen deze elementen het meest algemene gesteente: **graniet**. Onder de oceanen en onder het continentale graniet bestaat de korst voornamelijk uit basalt, waarin silicium, ijzer en magnesium overheersen.

We hebben helaas niet meer zekerheid over de samenstelling van de aarde, hoewel geologen er van uit gaan dat ze op vier plaatsen gesteenten hebben ontdekt die zich vanuit de mantel een weg naar het aardoppervlak hebben gebaand: in noord-Italië, zuidoost-Turkije, de Perzische Golf en Nieuw-Guinea. Deze donkere, zware gesteenten, de zogenaamde **peridotieten**, bestaan uit olivijn en pyroxeen. Het zijn silicaat-mineralen die uitsluitend bij hoge druk worden gevormd en rijk zijn aan ijzer en magnesium. De dichtheid van de peridotieten is zodanig dat S-golven er zich met dezelfde snelheid in zouden voortbewegen als aardbevingsgolven in de mantel.

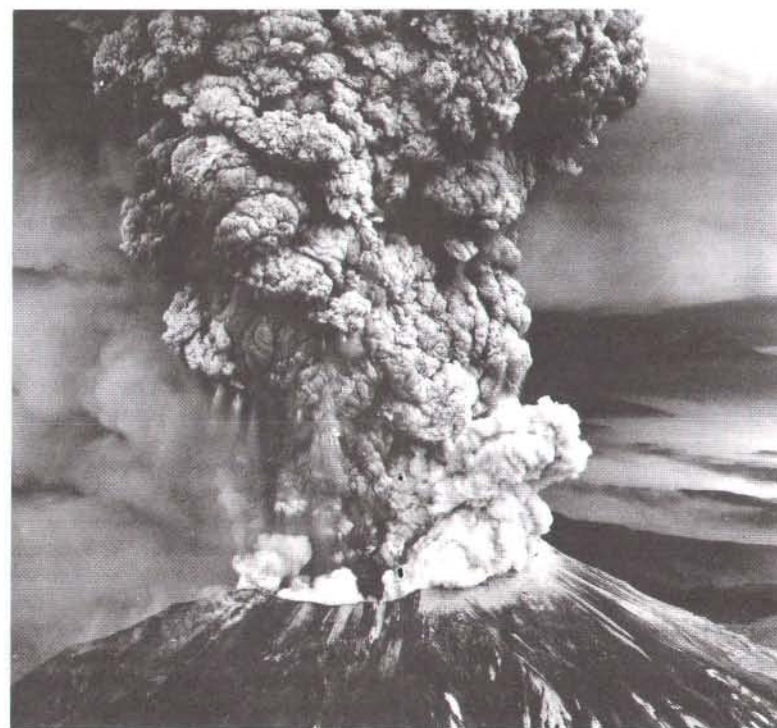
Het is tegenwoordig het meest aannemelijk dat de mantel grotendeels bestaat uit de elementen zuurstof, silicium, magnesium en ijzer. In de buitenste laag van de mantel komen deze elementen waarschijnlijk voor in de vorm van mineralen als olivijn, pyroxeen en granaat. Wanneer de druk van de erop liggende gesteenten nog groter wordt, rangschikken de atomen zich compacter, in 'hogedrukmineralen'. Dit verandert op zijn beurt de structuur van de gesteenten. Uiteindelijk zullen de mineralen in het diepste deel van de mantel waarschijnlijk ontleden tot eenvoudige oxyden.

Meteorieten, stenen uit de ruimte, verschaffen ons andere waardevolle aanwijzingen over de samenstelling van onze planeet. De meeste meteorieten die het aardoppervlak bereiken, zijn of **steen-** of **ijzermeteorieten**. Wanneer, zoals algemeen wordt aangenomen, meteorieten deel uitmaken van de resten van planetaire lichamen zoals de aarde, dan verte-

genwoordigen de steenmeteorieten waarschijnlijk mantelmateriaal en de ijzermeteorieten stukken van een planeetkern.

Als deze opvatting juist is – en het schijnt inderdaad dat de samenstelling van steenmeteorieten grofweg dezelfde is als die van de mantel – kunnen we door ijzermeteorieten te bestuderen veel te weten komen over de kern van de aarde. Ze bevatten hoofdzakelijk ijzer, ijzersulfide en een serie van de zogenaamde **siderofiele elementen**, inclusief nikkel, platina en andere sporenelementen zoals iridium, die bij voorkeur samen met ijzer voorkomen.

Natuurgeweld, zoals aardbevingen en vulkanisme, leverde de sleutel tot ons begrip van het binnenste der aarde. (Foto: US Geological Survey.)



Het magnetisch veld

Een gigantische dynamo

De aarde heeft een sterk magnetisch veld, en wetenschapsmensen buigen zich al eeuwen over het ontstaan ervan. Hoewel de oude Chinezen en Grieken al enig begrip van het aardmagnetisch veld schijnen te hebben gehad, duurde het tot de 17de eeuw voordat we de aard van het veld begrepen. We weten nu dat de metalen in de kern het aardmagnetisch veld veroorzaken.

William Gilbert, Engels natuurkundige en medicus, suggereerde dat de aarde zich als een enorme staafmagneet gedraagt. Zijn theorie hield stand tot in deze eeuw. Toen ontdekten geofysici dat het aardmag-

netisch veld ruwweg elke 200 000 tot 300 000 jaar omkeert: noord wordt zuid en zuid wordt noord. Deze omkeringen zijn strijdig met het idee van een permanente staafmagneet en het veld dat daarbij hoort.

In de afgelopen dertig jaar is er een verklaring voor de ompoling gevonden. Bij de draaiing van de aarde om z'n as kunnen de mantel en de korst dankzij de vloeibare buitenkern sneller draaien dan de vaste binnenkern. Sommige geofysici beweren dat dit tot gevolg heeft dat elektronen in de kern bewegen ten opzichte van elektronen in mantel en korst. In wezen stelt die beweging van de elektronen een natuurlijke dynamo in werking en daarmee een magnetisch veld, dat in vorm overeenkomt met dat van een staafmagneet.

De kleine variaties in de sterkte en richting van het magnetisch veld, die we inmiddels goed kennen, ontstaan waarschijnlijk door kleine wervelingen in de buitenkern nabij de grens met de mantel. Enkele recente waarnemingen wijzen erop dat de grens tussen kern en mantel hobbelig is, met ribbels van een kilometer of meer in doorsnee. Die zouden zich over een paar honderd tot een paar duizend kilometer kunnen uitstrekken. Geologen menen dat zulke hobbels de omkeringen van het magnetisch veld kunnen verklaren.

Vanaf het moment dat ze zeer zwakke magnetische velden konden meten, hadden geologen een nieuw, waardevol meetinstrument in handen. Veel gesteenten bevatten kleine hoeveelheden ijzer. Bij de vorming van deze gesteenten gedragen de ijzerdeeltjes zich als kleine kompassen, die zich richten volgens het dan heersende magnetisch veld van de

aarde. De magneetrichtingen van de mineralen (**paleomagnetisme** of **fossiel magnetisme**) leveren de aanwijzingen voor de omkeringen van het magnetisch veld.

Het fossiel magnetisme heeft nog een aanwijzing voor geologen in petto. Het magnetisch veld is aan de polen sterker dan bij de evenaar en dit beïnvloedt de hoek waaronder de ijzerdeeltjes zijn gemagnetiseerd. Door de richting en hoek van het magnetisch veld in een gesteente te meten, kunnen geologen de geografische breedte vaststellen waarop het gesteente oorspronkelijk werd gevormd. Door dit te vergelijken met de huidige geografische ligging van het gesteente, krijgen geologen een beeld van de draaiing en de beweging die landmassa's ten opzichte van elkaar hebben gemaakt.

Zeebodemspreiding

Oceanen scheiden continenten

Aan het begin van de zeventiende eeuw merkte de Engelse filosoof Francis Bacon op dat de contouren van de oostkant van de beide Amerika's en de westkant van Afrika eruit zagen alsof ze in elkaar zouden passen, zoals twee enorme stukken van een legpuzzel. In de volgende eeuwen vonden kolonisten op het Amerikaanse continent geweldige steenkoolafzettingen, waarvan de positie scheen aan te sluiten bij afzettingen aan de Europese kant van de legpuzzel.

Bovendien vonden geologen aan beide zijden van de Atlantische Oceaan de gefossiliseerde resten van identieke